



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL**

PEDRO SMITH MENANDRO

ANÁLISE DA RESPOSTA ACÚSTICA EM SEDIMENTOS MARINHOS

ARACRUZ

2014

PEDRO SMITH MENANDRO

ANÁLISE DA RESPOSTA ACÚSTICA EM SEDIMENTOS MARINHOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos.

ARACRUZ

2014

PEDRO SMITH MENANDRO

ANÁLISE DA RESPOSTA ACÚSTICA EM SEDIMENTOS MARINHOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo / UFES

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi – Examinador Interno
Universidade Federal do Espírito Santo/ UFES

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto – Examinador Externo
Universidade Federal Fluminense - UFF

Dedico este trabalho à minha família,
em especial aos meus pais, Paulo e Cristina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao meu orientador Alex Bastos, pelas orientações e ensinamentos sempre interessantes, pelas oportunidades, e pela confiança durante o desenvolvimento do trabalho.

À Valéria, pelas orientações no trabalho e por estar sempre pronta para passar seus conhecimentos, tanto profissionais como pessoais.

À professora Susana Vinzón, pela oportunidade de participar da coleta de dados do projeto Navigation aids for the North Channel of Amazon Rio: Geo-Acoustic Characterization of the sediment dynamics (CANALNORTE/GEOACUSTICA), financiado pela Capes. À equipe do Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC - UFRJ) pela organização da campanha de levantamento de dados, e tratamento dos dados sedimentológicos.

Aos professores participantes da banca, Renato Ghisolfi e Arthur Ayres, pela disponibilidade e pelo aceite em fazer parte da banca.

A todos os integrantes do Labogeo, sempre companheiros, ajudando uns aos outros e enriquecendo o cotidiano acadêmico do grupo.

Aos funcionários da Base Oceanográfica, sempre solícitos e agradáveis de conviver e trabalhar.

A todos os meus amigos, que não me ajudaram em nada, mas de alguma forma tornam a vida mais fácil.

À minha família que sempre me incentiva cada passo que sigo. Minhas irmãs, Helena e Luísa, que exigiram seus nomes aqui presentes. E a meus pais, exemplos de vida para mim, e possibilitarem tudo o que acontece comigo.

À Tarcila, pela perfeita companhia, amor e todo incentivo de sempre.

“O rio não quer chegar, mas ficar largo e profundo.”

Guimarães Rosa

RESUMO

A geoacústica submarina auxilia no entendimento do comportamento da propagação e atenuação do som no sedimento, dando uma base de informações que dá suporte às principais abordagens para interpretação de dados. A detecção de depósito lamoso em registros acústicos de alta resolução é, geralmente, de fácil distinção, aparecendo normalmente como pacotes sedimentares de baixa reflexão. No entanto, essa resposta acústica depende da frequência utilizada e de outras características do depósito, até mesmo da coluna d'água. A dinâmica desses pacotes lamosos pode ter desdobramentos em várias esferas, desde engenharia, como a questão de monitoramento de portos, até a biologia, com estudos de impacto na biota bentônica. A partir daí é necessário um desenvolvimento de um método rápido e eficiente para mapeamento desses pacotes e para o conhecimento dos processos envolvidos no transporte, deposição e ressuspensão.

Assim, esse trabalho tem dois enfoques principais divididos em dois estudos independentes: investigar como a resposta do sinal acústico de diferentes fontes muda de acordo com a frequência e as características do sedimento superficial (granulometria e densidade), e associar variações observadas nos registros acústicos com a mobilidade sedimentar ao longo de um ciclo de maré. A base de dados analisada é composta por registros geofísicos de alta frequência (3.5, 33, 210 kHz), propriedades físicas do sedimento superficial, densimetria in situ, correntometria e distribuição de material particulado em suspensão, os quais foram coletados na Plataforma Interna do Canal Norte do Rio Amazonas.

A primeira parte dos resultados apontou que metodologias distintas sondando a mesma área podem fornecer resultados completamente diferentes. Nas análises feitas, a frequência e a densidade foram importantes propriedades para entender as relações entre sedimento superficial e atributos acústicos.

Já o segundo capítulo, com enfoque que avaliou dinâmica sedimentar através de sistemas acústicos, mostrou que as alterações nos processos de transporte de sedimento foram reconhecidas pelo ADCP e pelo OBS, permitindo distinguir os registros acústicos do ecobatímetro e interpretar processos de dinâmica sedimentar.

Palavras-chaves: geoacústica; lama fluida; dinâmica sedimentar; Rio Amazonas.

ABSTRACT

Submarine geoacoustics helps in understanding the behavior of propagation and attenuation of sound in sediment, providing an information set which assists the major data interpretation approaches. The detection of muddy deposit through high resolution acoustic records is generally easy, usually appearing as free reflection layers. However, this acoustic response depends on the frequency used and other characteristics of the deposit, even of the water column. The dynamics of these muddy layers may have influence in many areas, from engineering and harbor maintenance, to biology and studies of impact on benthic biota. The development of a rapid and efficient mapping method for these deposits seems to be a demand for knowledge advance of the processes involved in the transport, deposition and suspension.

Thus, this study has two main approaches divided into two independent studies: i) investigate how the acoustic signal response from different sources changes with the frequency and sediment physical properties (grain size and density), and ii) associate variations observed in the acoustic records with sediment mobility over a tidal cycle. The dataset consists of high-frequency geophysical records (3.5, 33 and 210 kHz) , sediment physical properties, in situ density , hydrodynamics and distribution of suspended particulate matter, which were collected at the North Channel of Amazon River .

The first chapter showed that different survey methods at the same area can provide different results. Furthermore, the frequency and density were important properties to understand the relationship between surface sediment and acoustic features.

The second chapter was an attempt to evaluate sediment dynamics through acoustic system, and showed that the changes in the processes of sediment transport were recognized by the ADCP and OBS allowing to distinguish the acoustic echo sounder records and to interpret sedimentary dynamic processes.

Key-words: geoacoustic; fluid mud; sedimentary dynamics; Amazon River.

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Análise física das amostras de sedimento superficial.....	46
Tabela 2: Apresentação dos dados geofísicos (ecogramas e registros do perfilador de subfundo) por estação.....	51

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Mapa da área de estudo com as estações de coleta de dados. (Carta Náutica 200, Marinha do Brasil).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2: Gráfico situando os momentos de coleta de dados na curva de maré.....	22
Figura 3: Gráfico indicando os valores do coeficiente de reflexão e de amplitude para cada estação.	26
Figura 4: Análise de componentes principais.....	31
Figura 5: À esquerda, análise de cluster considerando os dados de densidade calculada; à direita, considerando os dados de densidade in situ..	32
Figura 6: Gráfico apresentando as penetrações dos pulsos de 3.5 kHz, 33 kHz (considerando o fundo como sendo o detectado pela frequência de 210 kHz) e a espessura da camada de lama fluida aferida pelo densímetro.....	34
Figura 7: Diferentes profundidades medidas por diferentes métodos nas estações onde foi identificada a presença de lama fluida: profundidades acústicas (3.5 kHz e 210 kHz), profundidade do topo da camada de lama fluida que o densímetro identificou, e profundidade na qual a concentração máxima de material em suspensão foi detectada (sendo 6,5 g/L o limite máximo do equipamento utilizado).	35
Figura 8: Registro do ecobatímetro que indicou a presença de haloclina na coluna d'água acompanhado com o perfil de salinidade.....	36
Figura 9: Na parte superior, o registro do ecobatímetro exemplificando nitidamente o descolamento do eco. Na parte inferior esquerda o registro do Densitune; à direita, em destaque as variações de densidade já no sedimento, indicando a presença de lama fluida.	37
Figura 10: Estação fixa indicada pelo ponto preto na Plataforma Interna do Rio Amazonas.....	43
Figura 11: Gráfico com os resultados hidrodinâmicos durante o ciclo de maré..	46
Figura 12: Gráfico da distribuição de material particulado em suspensão na coluna d'água (unidades nefelométricas de turbidez – NTU).....	46

Figura 13: Gráfico com as concentrações de material particulado em suspensão a diferentes profundidades, juntamente com a curva de maré (m) e as tensões de cisalhamento (N/m²).....47

Figura 14: Gráficos de backscatter do ADCP. A imagem superior indica o momento de maior energia, próximo a 14h, enquanto a inferior indica momentos menos energéticos, próximo a 18h (no canto esquerdo).48

Figura 15: Registros das medições do densímetro a esquerda; a direita registros com destaque para a porção final do perfil em dois momentos (14h e 18h), mostrando a ausência de um pacote espesso de lama fluida..49

Figura 16: Registros do perfilador de subfundo. O registro superior foi coletado às 14h, e o inferior às 18h.....50

Figura 17: Registros do ecobatímetro para dois momentos: a) às 14 horas, com ruídos entre os horizontes detectados pelas diferentes frequências; b) às 18 horas, com descolamento do eco mais nítido.50

Figura 18: Esquema ilustrativo representando a interpretação da dinâmica sedimentar a partir de ferramentas acústicas e óticas.....53

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</i>	<i>14</i>
1.1 APRESENTAÇÃO	15
1.2 REFERÊNCIAS	16
<i>CAPÍTULO 2 - RESPOSTA ACÚSTICA DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS EM DEPÓSITOS LAMOSOS – ESTUDO DE CASO NA PLATAFORMA ADJACENTE AO CANAL NORTE DO RIO AMAZONAS.....</i>	<i>18</i>
2.1 INTRODUÇÃO.....	18
2.2 METODOLOGIA	20
2.3 RESULTADOS	25
2.4 DISCUSSÃO.....	33
2.5 CONCLUSÃO	37
2.6 REFERÊNCIAS	38
<i>CAPÍTULO 3 - INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA SEDIMENTAR EM FUNDOS LAMOSOS A PARTIR DE FERRAMENTAS ACÚSTICAS.....</i>	<i>42</i>
3.1 INTRODUÇÃO.....	42
3.2 METODOLOGIA	43
3.3 RESULTADOS	45
3.4 DISCUSSÃO.....	51
3.5 CONCLUSÃO	53
3.6 REFERÊNCIAS	54
<i>CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</i>	<i>56</i>

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Embora a busca por hidrocarbonetos represente a maior aplicação do método sísmico, o uso para estudos de alta resolução de geologia rasa vem apresentando avanços técnicos nos últimos anos (Kearey et al, 2009), que contribuem para atividades humanas tais como o planejamento obras civis, o manejo de recursos pesqueiros e a definição e manutenção rotas de navegação. Além disso, a investigação indireta por métodos geofísicos produz mais informação e em áreas maiores quando comparada a métodos diretos como testemunhagens e amostragens. Souza (2006) fez uma revisão da aplicabilidade dos métodos geofísicos em áreas rasas, mostrando diversas outras aplicações, vantagens e desvantagens.

A geoacústica submarina auxilia no entendimento do comportamento da propagação e atenuação do som no sedimento, dando uma base de informações que dá suporte as principais abordagens para interpretação de dados. Nos métodos sísmicos convencionais, por exemplo, parte-se do princípio que a fração da energia refletida do pulso é determinada pelo contraste de impedância acústica entre duas camadas.

O estudo de ecocaráteres, por exemplo, inicialmente apareceu em investigações em áreas profundas (Damuth, 1975); contudo, muitos estudos em regiões rasas utilizam como método de caracterização a definição de ecocaráteres associada à distribuição granulométrica do local (Quaresma et al, 2001; Belo et al, 2003; García-García et al, 2004; Catanzaro et al, 2004; Palomino et al., 2009), e em várias situações o caráter do eco não responde satisfatoriamente à granulometria do sedimento superficial, estando muitas vezes relacionado com a densidade do material e seu grau de compactação.

Com isso, o mapeamento de fundos marinhos em áreas de grande aporte e acumulação de sedimentos finos, cria uma questão científica importante no que tange a aplicabilidade de diferentes fontes acústicas. A segurança na navegabilidade em canais portuários devido a presença de lama fluida, por exemplo, é um dos focos que vêm sendo discutidos em trabalhos de identificação de lama fluida (Wurpts, 2005; Fontein, 2007). Essa questão pode ser explicada pelo fato de que levantamentos batimétricos são realizados operando com frequências em torno de 210 kHz, o que identifica profundidades que eventualmente não representam a profundidade náutica, quando, por exemplo, parte da lama fluida é contabilizada como fundo marinho, perdendo espessura de coluna d'água para calado de embarcações (Mehta, 2013).

Mehta (2013) destaca que as propriedades da lama fluida dependem de fatores físico-químicos, biológicos e hidrodinâmicos, e os limites de delimitação variam também devido a composição do sedimento, composição da água e o critério para reconhecimento (densidade e concentração da suspensão). Já no campo de transporte sedimentar a lama fluida representa uma importante contribuinte, pois mesmo que apareça em pequenas espessuras, a concentração de sedimento suspenso é muito alta, o que acaba formando significativa carga sedimentar (Mehta, 2013).

Assim, esse trabalho tem como proposta analisar como a resposta do sinal acústico de diferentes fontes muda de acordo com a frequência e as características do sedimento superficial (granulometria e densidade), buscando contribuir para o entendimento e desenvolvimento da geoacústica submarina. O trabalho tem como metas: i) Analisar a influência da granulometria e da densidade como variáveis determinantes na resposta acústica; ii) Avaliar a penetração e a reflexão do sinal acústico de acordo com o tipo sedimentar e a frequência do pulso; iii) Identificar e avaliar o transporte sedimentar a partir de ferramentas geofísicas de alta resolução.

1.1 APRESENTAÇÃO

O trabalho tem como tema central de pesquisa a resposta acústica de fontes de alta resolução em fundos lamosos. A área de estudo está na Plataforma Interna onde desemboca o Canal Norte do Rio Amazonas, que vem sendo estudada sob diferentes enfoques a partir do levantamento de dados que envolveu geofísica, hidrodinâmica e sedimentologia no âmbito do Projeto “Navigation aids for the North Channel of Amazon Rio: Geo-Acoustic Characterization of the sediment dynamics (CANALNORTE/GEOACUSTICA)”.

A dissertação está dividida em quatro capítulos. Esse primeiro capítulo, além de apresentar a dissertação, aborda o estado da arte da temática principal. O capítulo 2 aparece na forma de um artigo independente, analisando o sinal acústico conforme algumas características do sedimento superficial. O capítulo 3 também está na forma de um artigo independente, tentando avaliar como um sistema acústico pode ser usado para estudos de mobilidade sedimentar. O capítulo quatro é composto pelas considerações finais do trabalho.

1.2 REFERÊNCIAS

Belo, W.C.; Dias, G.T.M. ; Dias, M.S. 2003. O fundo marinho da baía da Ilha Grande, RJ: o relevo submarino e a sedimentação no canal central. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 20, p. 5-15,

Catanzaro, L. F. ; Baptista Neto, J. A. ; Guimaraes, M. S. D. ; Silva, C.G. 2004. Distinctive sedimentary processes in Guanabara Bay - SE/Brazil, based on the analysis of echo-character (7.0 kHz). *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 69-83.

Damuth, J.E. 1975. Echo character of western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and the distribution of the terrigenous sediments. *Mar. Geol.* 18:17–45.

Fontein, W.F; Byrd, R.W. 2007. **The nautical depth approach, a review for implementation.** Wodcon XVIII Annual Dredging Seminar.

García-García, A.; García-Gil, S.; Vilas, F. 2004. Echo Characters and recent sedimentary processes as indicated by high-resolution sub-bottom profiling in Ría de Vigo (NW Spain). *Geo-Mar Lett*, v. 24, p. 32-45.

Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. **Geofísica de Exploração.** Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos. 2009

Mehta, A.J. 2013. **An introduction to hydraulics of fine sediment transport** (Advanced series on ocean engineering) v. 38. World Scientific

Palomino, D.; Vazquez, J.T.; Del Río, V.D.; Fernández-Salas, L.M. 2009. Estudio de los procesos sedimentarios recientes de la Bahía de Palma a partir del análisis de la morfología y la respuesta acústica (Islas Baleares, Mediterráneo Occidental). *Revista de la Sociedad Geológica de España*. 22 (1-2)

Quaresma, V.S.; Dias, G.T.M.; Baptista Neto, J.A. 2001. Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara – RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18(2): 201–214.

Souza, L. A. P. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Química e Geológica, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Wurpts, R. 2005. 15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters. **Terra et Aqua**. 99: 22-32.

CAPÍTULO 2 - RESPOSTA ACÚSTICA DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS EM DEPÓSITOS LAMOSOS – ESTUDO DE CASO NA PLATAFORMA ADJACENTE AO CANAL NORTE DO RIO AMAZONAS

2.1 INTRODUÇÃO

O estudo detalhado do comportamento do sinal acústico nos sedimentos marinhos é complexo, pois além de envolver várias propriedades físicas dos sedimentos, pode também envolver diferentes fases como sedimento inconsolidado, água e gases. Tentativas de desenvolver modelos matemáticos para descrever o comportamento de ondas acústicas nos sedimentos vêm sendo realizadas há décadas (Stoll, 1980), no entanto, sabe-se que a eficácia para descrever de maneira unificada esse processo é difícil de ser alcançada, haja vista as combinações quase ilimitadas de variáveis nos diferentes tipos sedimentares. Assim, vários trabalhos vêm sendo realizados a fim de investigar a inversão de parâmetros acústicos dos sedimentos em propriedades físicas e interpretações geológicas (Hamilton & Bachman, 1982; Lambert, 1993; Stevenson, 2002; Macedo *et al.*, 2009; Ayres Neto *et al.*, 2013), permitindo o aprimoramento do mapeamento acústico do fundo marinho (Davis *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2004).

À medida que as propriedades físicas e geotécnicas variam, varia também a velocidade de propagação das ondas acústicas, definindo diferentes impedâncias acústicas, permitindo assim a interpretação de um registro geológico e o estudo das variáveis envolvidas na resposta do sinal acústico. A interpretação de características observadas em registros acústicos de alta resolução (como penetração, reflexão superficial e descolamento do eco) deve considerar fundamentalmente a frequência do sinal acústico e as características superficiais e subsuperficiais do depósito ou da suspensão (no caso da lama fluida), mas também pode envolver a sensibilidade do sistema utilizado, a atenuação do sinal proporcionada pelo depósito lamoso, entre outros aspectos que dependerão do nível de detalhamento da investigação.

A detecção de depósito lamoso em registros acústicos de alta resolução é, geralmente, de fácil distinção, aparecendo normalmente como pacotes sedimentares de baixa reflexão (Souza, 2006; Quaresma et al, 2011; Godinho, 2012). No entanto, essa resposta acústica depende da frequência utilizada e de outras características do depósito, até mesmo da coluna d'água. Já a lama fluida, classificada por McAnally et al (2007) como uma suspensão aquosa de sedimento fino altamente concentrada com densidade entre 1080 e 1200 kg/m³, geralmente não é detectada de forma evidente por métodos convencionais da geofísica de alta resolução.

O estudo do comportamento desses depósitos lamosos e a determinação de formas efetivas de detecção e monitoramento são muito importantes para contribuir com o entendimento da dinâmica sedimentar. Na Plataforma Amazônica, alguns trabalhos desenvolvidos como o Projeto AmasSeds (A Multi-disciplinary Amazon Shelf SEDiment Study) concluíram que a ressuspensão desses sedimentos é a principal fonte sedimentar para regiões próximas à costa ao norte da desembocadura do Rio Amazonas, e ainda oferece eventualmente fonte sedimentar para fluxos gravitacionais que levam sedimentos para regiões mais profundas (Kuehl et al, 1996). Além disso, foi feita uma estimativa de que 60% a 90% do aporte sedimentar em suspensão proveniente do Rio Amazonas fica concentrado na camada de lama fluida (Kineke et al, 1996), o que corrobora a importância da sua investigação.

A Plataforma Amazônica, área escolhida para esta investigação, é considerada crítica para a navegação (Fernandes, 2010). Isso se dá, em parte, pela amplitude de maré, pela presença de espessas camadas de lama fluida e pela mobilidade de bancos de areia na Plataforma Interna. McAnally et al. (2007) sugerem que a gestão dos problemas na navegação causados em decorrência da deposição ou suspensão dos sedimentos finos está baseada em três alternativas: i) controle da fonte desses sedimentos; ii) controle da formação dos depósitos lamosos; e iii) remoção desses sedimentos. O controle da formação dos depósitos é complicado, pois envolve uma série de fatores de difícil domínio, como por exemplo reduzir o aporte sedimentar e controlar os fatores que favorecem a floculação dos sedimentos finos (sal, materiais

orgânicos e esgoto, entre outros). Já a remoção desses depósitos representa a alternativa mais utilizada, embora muitas vezes não seja realizada de maneira eficaz, gerando custos para manutenção de portos, além de ser uma alternativa de alto impacto ambiental. Assim, a investigação do comportamento do sinal acústico neste tipo de fundo e de suspensão é muito importante tanto para questões em torno da determinação da profundidade náutica quanto no aspecto científico, pois vem contribuir para as discussões em torno da navegabilidade (Wurpts, 2005; Fontein & Byrd, 2007) e de formas eficazes de detecção da lama fluida.

A partir do que foi apresentado, o objetivo desse capítulo é investigar as diferentes respostas acústicas em função da frequência utilizada e dos parâmetros físicos sedimentares (granulometria e densidade), utilizando dados sedimentológicos, de batimetria de dupla frequência e de perfilador de subfundo obtidos na Plataforma interna do Rio Amazonas.

2.2 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido a partir de uma base de dados coletados na Plataforma do Rio Amazonas, que reúne registros geofísicos de alta resolução (ecobatimetria de dupla frequência – 33 e 210 kHz - e perfilagem de subfundo – 3.5 kHz), análise sedimentológica de amostras de sedimento superficial e medidas de densidade *in situ*.

Os dados foram coletados no canal principal de navegação, entre 11 e 15 metros de profundidade, seguindo um transecto perpendicular a costa. A figura 1 mostra a distribuição das 12 estações, espaçadas a cada 10 km, próximas a desembocadura do Canal Norte do Rio Amazonas (Fig. 1), totalizando 12 estações.

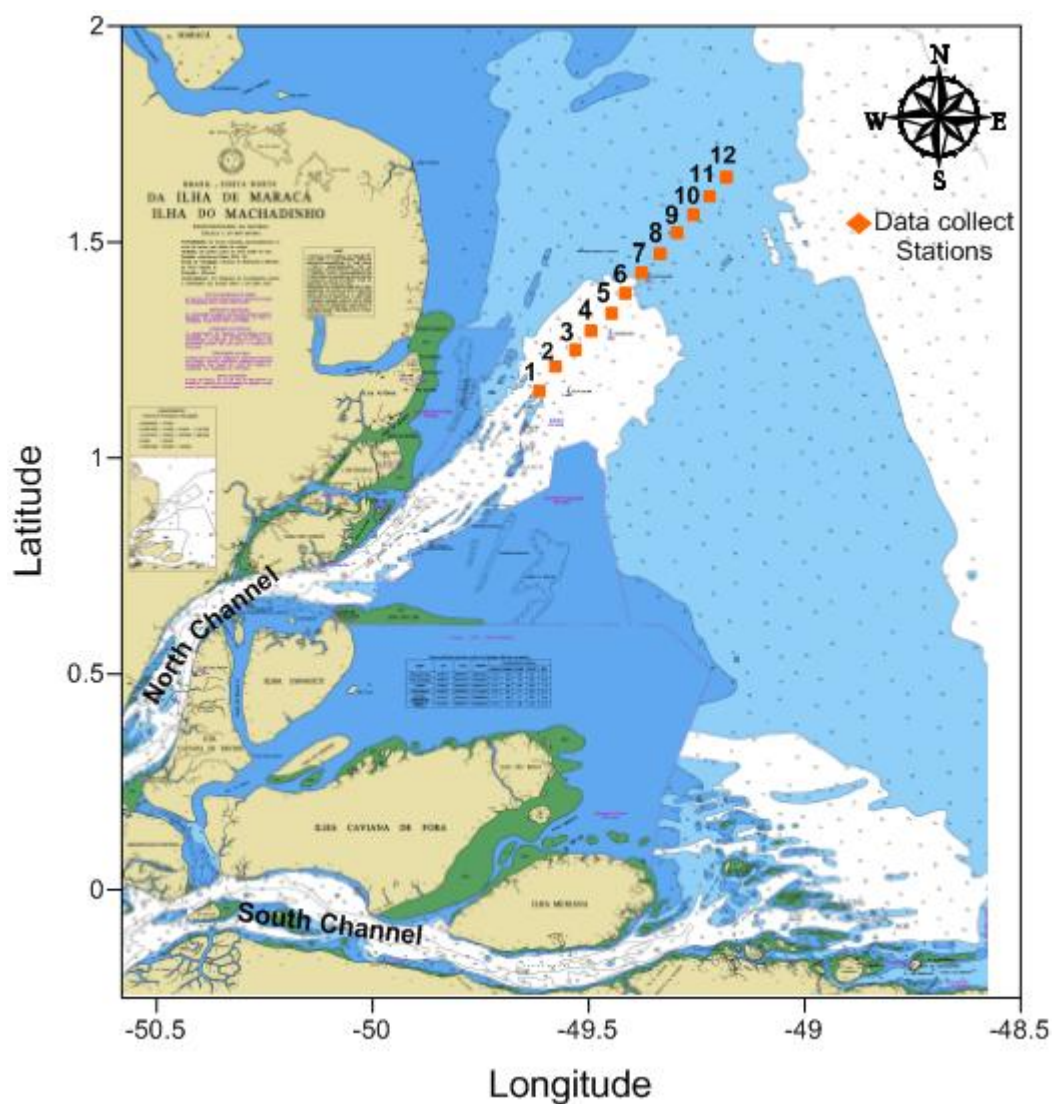


Figura 1: Mapa da área de estudo com as estações de coleta de dados. (Carta Náutica 200, Marinha do Brasil)

A campanha de levantamento de dados foi realizada em junho de 2012 durante um período de maré de quadratura. A figura 2 mostra a curva de maré com os momentos de coleta de dados em cada estação.

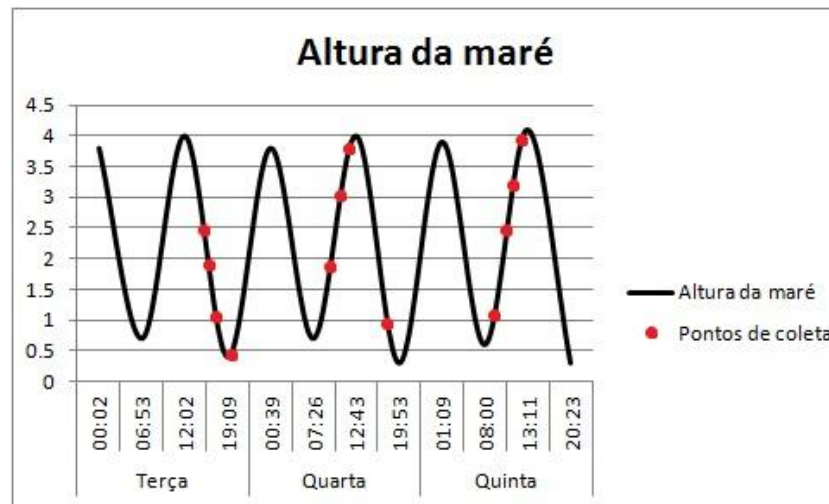


Figura 2: Gráfico situando os momentos de coleta de dados na curva de maré.

Dados Geofísicos

Dados acústicos foram coletados usando três frequências distintas: 3.5 kHz, 33 kHz e 210 kHz. A primeira é de uma fonte sísmica de alta resolução (perfilador de subfundo modelo Stratabox), e as outras duas foram operadas com um ecobatímetro de dupla frequência (Syquest Bathy-500 DF). Os dados foram adquiridos continuamente, contudo os registros que serão apresentados representam um padrão de cada estação.

Os registros sísmicos foram visualizados digitalmente no software Kogeo, o qual permitiu a extração de valores de amplitude do sinal refletido, enquanto os dados da ecobatimetria de dupla frequência foram interpretados na forma impressa.

A análise geoacústica foi baseada nos cálculos de coeficiente de reflexão e de valores de atenuação do sinal acústico. Com a impedância acústica de diferentes meios é possível calcular o coeficiente de reflexão de determinado estrato sedimentar, que representará a quantidade de energia refletida em função de vários parâmetros do sedimento.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: R é o coeficiente reflexão e Z é a impedância acústica dos diferentes meios, que depende da velocidade de propagação do som no meio e da densidade do meio. Os valores de velocidade do som utilizados para cada tipo de sedimento característico seguiram os valores encontrados por Falcão e Ayres (2010), e foram utilizados para o cálculo da impedância acústica.

Para o cálculo de atenuação do sinal foi utilizado como base o estudo de Hamilton (1972), que propôs uma equação que relaciona a atenuação à frequência:

$$\alpha = \kappa \cdot f^n \quad (\text{Equação 2})$$

Onde “k” é uma constante que depende do tipo sedimentar e “n” é um expoente da frequência.

Medidas *in situ* de densidade

As medidas de densidade *in situ* foram realizadas em cada estação com um densímetro (Densitune Silt Density Probe, fabricante Stema Systems), que possui um sensor metálico de diapasão que vibra a uma frequência pré-determinada cuja alteração ocorre de acordo com a densidade do sedimento em que ele é inserido. Os valores de frequência em milivolts são convertidos em g/L.

A calibração dos dados de densimetria foi realizada a partir das amostras de sedimento de fundo coletadas durante a campanha. Para elaboração do arquivo de calibração, as amostras foram homogeneizadas em um recipiente com cerca de 50 L, de forma que o sensor (probe) do densímetro pudesse ser inserido sem contato direto com o recipiente. Depois disso, 2L da amostra foram retirados e pesados, bem como 2L de água em um recipiente similar. Por regra de três foi estabelecida a densidade do sedimento.

$$\text{amostra} = \rho \text{ água} * P(\text{amostra}) / P(\text{água}) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde ρ é a densidade e P é o peso. Foi obtido um grupo de dados acima de 1300 g/L, entre 1300 e 1070 g/L e abaixo de 1070 g/L, com diluição gradativa do sedimento em água doce. A cada etapa de diluição, uma nova

amostra de sedimento era retirada e pesada e sua densidade calculada, bem como um novo registro de densidade através do sensor.

Medidas de concentração de material particulado em suspensão

Foram realizadas em cada estação com o equipamento óptico OBS 3A, da Campbell Scientific. O princípio de medição do equipamento consiste em considerar que o retroespalhamento da luz medido é diretamente proporcional à quantidade e tamanho das partículas em suspensão na amostra; outros fatores além do material particulado em suspensão podem influenciar a medição do sinal de retroespalhamento. O sensor de turbidez do equipamento OBS 3A fornece valores de turbidez na escala NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Desta maneira, para a correta correlação entre o sinal do OBS e a concentração de materiais particulados em suspensão (MPS) é necessário realizar procedimentos de calibração do equipamento.

Coleta de sedimento superficial

Em cada estação foi coletada uma amostra de sedimento superficial com um amostrador de arrasto. As amostras foram processadas em laboratório, passando por análise granulométrica a laser (Mastersize 2000, Malvern Instruments) e cálculo de densidade do sedimento em laboratório a partir dos pesos seco e úmido da amostra em um volume conhecido (Amos & Sutherland, 1994).

Análise estatística

Foi realizada uma abordagem estatística utilizando-se o software MVSP (Multi-Variate Statistical Package) para identificar as relações entre as propriedades analisadas e os registros geofísicos.

As variáveis envolvidas na análise de componentes principais foram as seguintes: penetração máxima alcançada pelo sinal de 3.5 kHz, granulometria média (obtida após processar os dados de granulometria a laser no pacote estatístico Gradistat – Blott and Pye, 2001), densidade do sedimento calculada em laboratório, teor de lama e coeficiente de reflexão do sedimento superficial.

A outra aplicação estatística foi a análise de cluster pelo método UPGMA utilizando distância euclidiana, na qual o mesmo conjunto de dados foi analisado por estação. Contudo, essa análise foi feita de duas maneiras: utilizando, além do conjunto anteriormente citado, os dados de densidade calculada em laboratório, e considerando as medições de densidade *in situ*.

2.3 RESULTADOS

Características físicas do sedimento superficial

A análise granulométrica das amostras de sedimento superficial mostrou uma transição do fundo arenoso para lamoso entre as estações 2 e 3, assim como a densidade do sedimento superficial determinada em laboratório (Tabela 1). Já a lama fluida só apareceu nas sondagens densimétricas a partir da estação 6.

Tabela 1: Análise física das amostras de sedimento superficial.

Estação	Granulometria Média (Φ)	Teor de lama (%)	Densidade (kg/m ³)
1	5,24	75,5	1847,67
2	3,47	34,5	1692,43
3	6,51	95,7	1526,73
4	7,12	99,2	1523,00
5	6,90	97,4	1483,26
6	6,98	98,7	1477,88
7	6,61	97,6	1553,27
8	6,02	92,3	1352,57
9	6,81	97,5	1358,25
10	6,64	98,5	1349,19
11	6,03	94,7	1525,30
12	6,20	95,6	1483,61

Sinal Acústico

Os resultados geofísicos indicam que uma transição do fundo arenoso para lamoso ocorre entre as estações 2 e 3, tanto nos registros acústicos (Tabela 2) como nos cálculos do coeficiente de reflexão e valores de amplitude do sinal (gráfico da Fig. 3). A tendência observada nos resultados foi de maiores coeficientes de reflexão para maiores densidades e maiores granulometrias, conforme esperado.

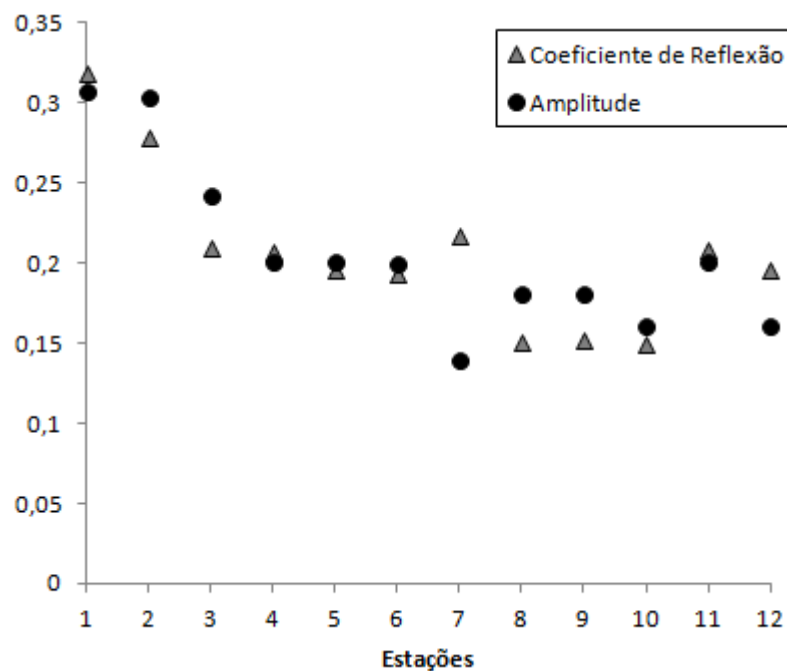


Figura 3: Gráfico indicando os valores do coeficiente de reflexão e de amplitude para cada estação.

Descrevendo brevemente um panorama geral no que se refere à reflexão, pode-se dizer que, com base na intensidade de reflexão do refletor superficial, as duas primeiras estações se distinguem das demais: registros sísmicos mostram uma reflexão superficial relativamente mais forte (com traço mais escuro), e as duas frequências da ecobatimetria não detectaram refletores de fundo diferentes, isto é, não houve descolamento do sinal e nem observa-se um sinal superficial muito alargado (como visto na estação 10 – Tabela 2). Já no restante das estações, a reflexão da superfície foi mais fraca (com camadas sedimentares superficiais transparentes), conforme indicam os valores de coeficiente de reflexão, permitindo maior penetração do sinal sísmico e

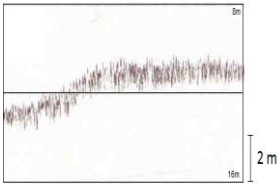
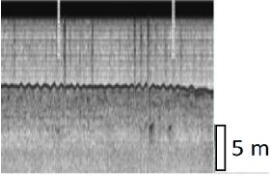
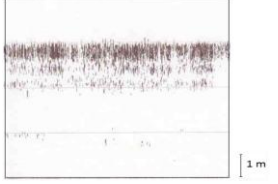
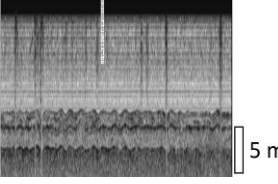
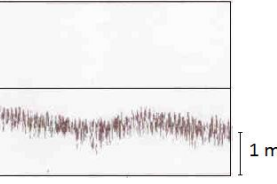
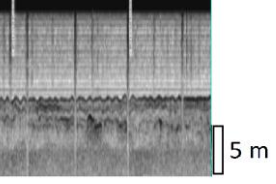
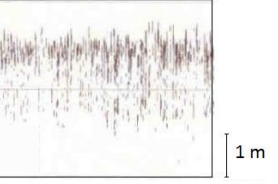
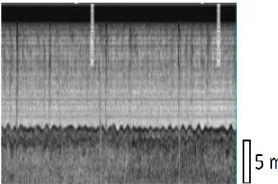
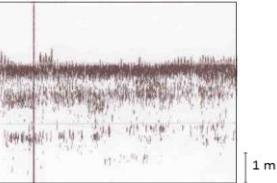
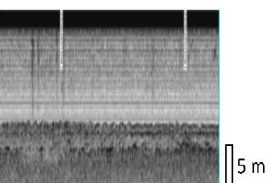
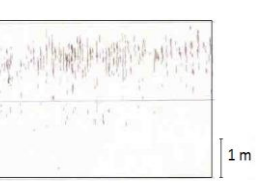
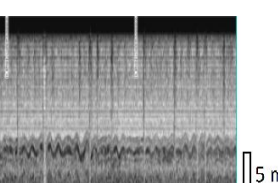
descolamento do sinal nas frequências do ecograma. Assim, a detecção do fundo nem sempre foi unânime por todas as frequências, indicando que, além das características sedimentológicas/geotécnicas do fundo, outras variáveis (comprimento de onda do pulso, resolução vertical do sistema utilizado) devem ser consideradas na interpretação dos registros acústicos.

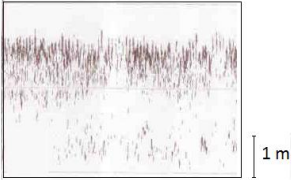
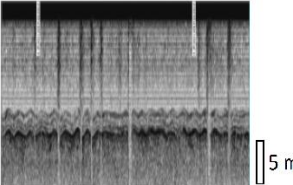
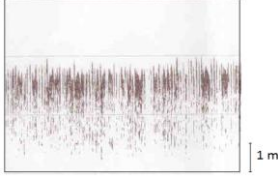
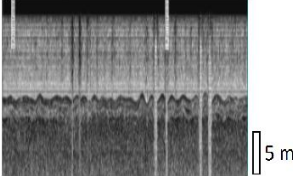
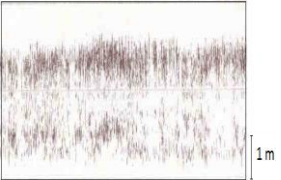
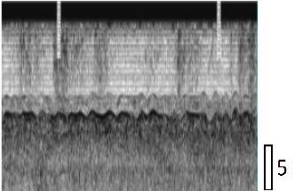
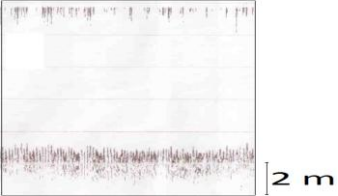
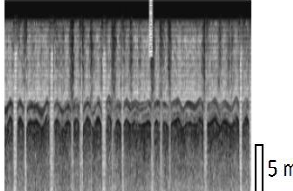
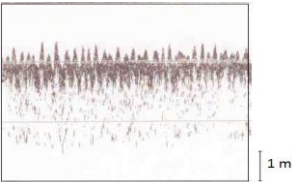
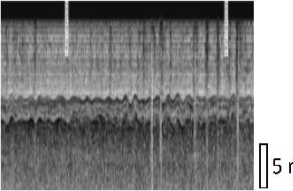
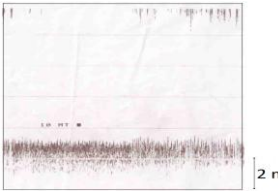
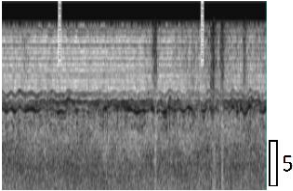
Os dados mostraram coerência entre os registros do perfilador de subfundo e de ecobatimetria, e, em geral, onde a reflexão sísmica foi mais forte e a penetração do sinal sísmico menor, não houve descolamento entre os horizontes correspondentes às duas frequências do ecobatímetro. A penetração do sinal acústico foi maior com a diminuição da frequência (comprimento de onda do pulso com menos resolução), estando também associada a menores densidades do sedimento e consequente menor atenuação do sinal acústico.

A resolução e a sensibilidade dos sinais de diferentes frequências para detectar variações de impedância acústica ajudam na explicação do descolamento do eco, ou eco duplo; a frequência mais alta (210 kHz) detecta um fundo mais raso, e a frequência de 33 kHz penetra e registra outro refletor, como é possível observar bem nas estações 3, 4, 5, 6, 7 e 8 (Tabela 2). A explicação para o fato de alguns registros do ecobatímetro apresentarem um descolamento das frequências e outros registrarem mais ruído entre as frequências é complexa e provavelmente passa pelas características geotécnicas do depósito sedimentar. Um fator a ser considerado é a consolidação do pacote lamoso, o que poderia estar relacionado com dinâmica sedimentar. O gráfico da figura 2 não mostra tendência clara entre momento de coleta (de acordo com a curva da maré) e registros com descolamento do eco mais nítido. As estações 3, 4, 7 e 8 (Tabela 2) foram as que registraram melhor o descolamento do eco e são locais em que os dados foram coletados em momentos próximos a estufa de maré, ou seja, momento no qual a dinâmica sedimentar é menos intensa e ocorre a decantação de partículas, tornando a suspensão mais densa, mas sem tempo para o processo de consolidação do sedimento.

Um dos efeitos que afeta a penetração do sinal é a atenuação. Pela relação proposta por Hamilton (1972), a atenuação é uma taxa representada pela unidade dB/m. Dessa forma, a energia do pulso inicial é importante para compreender as diferentes penetrações. As fontes utilizadas no levantamento dos dados emitem pulsos com as seguintes especificações: a) 160 dB para a frequência de 210 kHz; b) 175 dB para as frequências de 33 e 3.5 kHz. Ao calcular a taxa de atenuação utilizando os valores propostos por Hamilton (1972) para sedimentos finos (silte argiloso) referentes às constantes presentes na fórmula, chega-se aos seguintes valores: i) 0,61 dB/m para a frequência de 3.5 kHz; ii) 5,08 dB/m para a frequência de 33 kHz; iii) 28,94 dB/m para a frequência de 210 kHz.

Tabela 2: Apresentação dos dados geofísicos (ecogramas e registros do perfilador de subfundo) por estação.

Estações	Registros Geofísicos		Estações	Registros Geofísicos	
	33/210 kHz	3.5 kHz		33/210 kHz	3.5 kHz
1			4		
2			5		
3			6		

Estações	Registros Geofísicos		Estações	Registros Geofísicos	
	33/210 kHz	3.5 kHz		33/210 kHz	3.5 kHz
7			10		
8			11		
9			12		

Análise estatística

Primeiramente uma análise de componentes principais (PCA) foi feita com as seguintes variáveis: penetração máxima alcançada pela frequência de 3.5 kHz, granulometria média, densidade calculada em laboratório, teor de lama e coeficiente de reflexão do sedimento superficial.

A figura 4 mostra o resultado da análise. Observa-se que a densidade e o coeficiente de reflexão estão bem correlacionados; o teor de lama e a granulometria média também aparecem correlacionados, sendo este último par menos correlacionado provavelmente devido ao uso de uma média granulométrica, que pode distanciar essa correlação no caso de amostras de sedimento que resultaram em distribuições granulométricas bimodais. A penetração do sinal sísmico aparece em oposição ao coeficiente de reflexão, já que quanto maior o coeficiente de reflexão, mais energia será refletida na superfície, e menos energia terá o pulso para continuar sua propagação para o interior do depósito sedimentar. O teor de lama poderia estar mais próximo da densidade, mas como variou pouco e de maneira mais similar com a granulometria média, acabou sendo distanciado, corroborando a ideia de que nem sempre há uma correlação direta entre conteúdo lamoso e densidade, isto é, a lama pode se apresentar com densidades variadas.

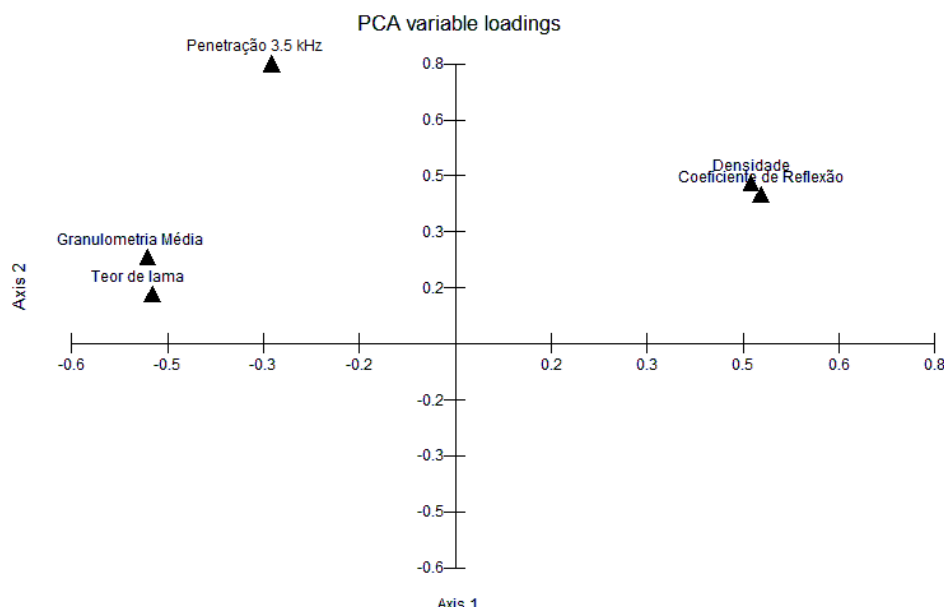


Figura 4: Análise de componentes principais.

A outra parte da abordagem estatística foi a análise de cluster, na qual o mesmo conjunto de dados foi analisado para cada estação. Além disso, a análise foi feita de duas

maneiras: uma utilizando os dados de densidade calculada em laboratório, e a outra considerando as medições de densidade in situ.

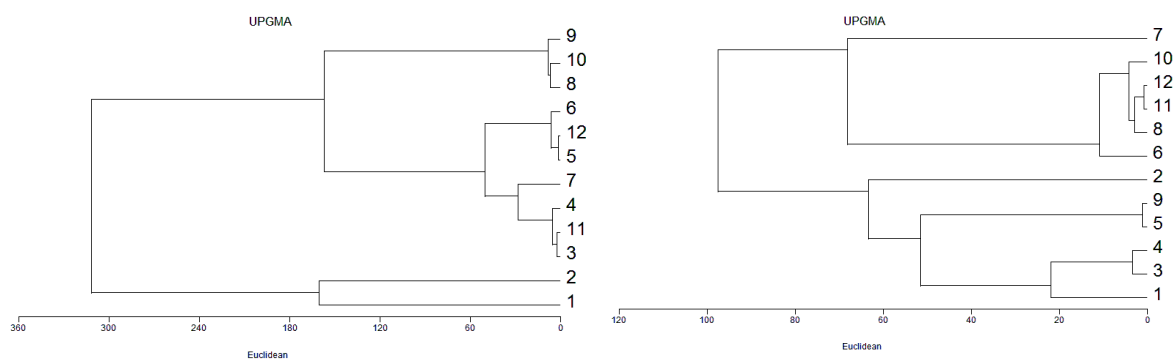


Figura 5: À esquerda, análise de cluster considerando os dados de densidade calculada; à direita, considerando os dados de densidade in situ.

O nível de corte foi escolhido de acordo com o ponto onde ocorre uma alteração evidente na distância entre os “grupos” e com o nível de detalhamento que condiz com a análise realizada (Wilks, 2006), sendo o gráfico da esquerda com corte em 150, e o da direita em 70. O primeiro gráfico mostra, fundamentalmente, 3 agrupamentos. O primeiro grupo parece determinado pelos menores teores de lama (estações 1 e 2), granulometrias mais grossas, além da baixa penetração do sinal sísmico e altos coeficientes de reflexão; o segundo grupo possui valores de densidade intermediários, e é subdividido entre dois intervalos de densidade: 1477-1483 kg/m³ para as estações 6, 12 e 5, e 1523-1553 kg/m³ para as estações 3, 4, 7 e 11; e o terceiro grupo (estações 8, 9 e 10) apresentou valores ainda mais baixos de densidade (variando entre 1349 e 1358 kg/m³) e de coeficiente de reflexão, com pouca variação no teor de lama. Há alguma separação ainda entre as duas primeiras estações (grupo 1) das demais, corroborando as interpretações feitas inicialmente pelos registros geofísicos e pela análise granulométrica.

Já o segundo gráfico (à direita), ao utilizar os dados de densidade in situ, separou basicamente dois grupos. O grupo A (1, 3, 4, 5, 9 e 2) parece representar aquelas estações onde não há lama fluida, com exceção do ponto 9, que apesar de mostrar lama fluida no registro do densitune, apresentou grandes similaridades com as propriedades da estação 5. O outro grupo (B), representado pelas estações 6, 7, 8, 10, 11 e 12, reúne o grupo A a partir da estação onde começa a observação de lama fluida (estação 6), com pouca variação das outras propriedades.

2.4 DISCUSSÃO

Os resultados das características físicas do sedimento e dos padrões acústicos registrados que foram apresentados estão em concordância com um importante trabalho de Akal (1970), que observou as propriedades físicas que afetavam a reflexão de ondas sonoras de vários locais, e encontrou uma correlação entre porosidade e coeficiente de reflexão, destacando que as menores densidades estão associadas a maiores porosidades, proporcionando uma reflexão mais fraca. Baldwin (1985) encontraram maiores correlações entre impedância acústica e densidade do que entre impedância acústica e granulometria, resultados que são similares ao conjunto de dados aqui apresentados, inclusive nas análises estatísticas.

De acordo com a Equação 2 descrita anteriormente, os valores de atenuação devem aumentar conforme aumenta a frequência, o que é coerente com os dados acústicos apresentados e com outros estudos (Robb et al, 2006; Macedo et al, 2009), isto é, quanto maior a frequência, maior a atenuação e menor a penetração. Uma das conclusões do estudo de Hamilton (1972) foi que, em sedimentos marinhos, a atenuação é maior em areias finas do que em areias grossas e em silte/argila devido ao arranjo do depósito (angularidade e esfericidade dos grãos, e porosidade). No entanto, outras características do arcabouço estratigráfico devem ser consideradas.

O gráfico da figura 6 apresenta as diferentes penetrações das frequências. Considerou-se para a construção deste gráfico que o fundo era o refletor detectado pela frequência de 210 kHz, já que esta é a metodologia usada nas sondagens hidrográficas (PIANC, 1997). A partir disso, foi plotada a penetração alcançada pelo sinal de 33 kHz e a penetração até o primeiro refletor sísmico interno identificado pelo sinal de 3.5 kHz, além da espessura da camada de lama fluida (até 1200 kg/m³) detectada pelo densitune. Os dados corroboram a ideia de que as frequências mais altas atenuam mais rapidamente. Além disso, no caso da primeira estação, o coeficiente de reflexão do fundo é relativamente alto e nenhuma frequência registrou penetração do sinal; já na sexta estação, que é o ponto onde começa a aparecer lama fluida mais significativamente, a frequência de 3.5 kHz sequer identifica o primeiro refletor como fundo.

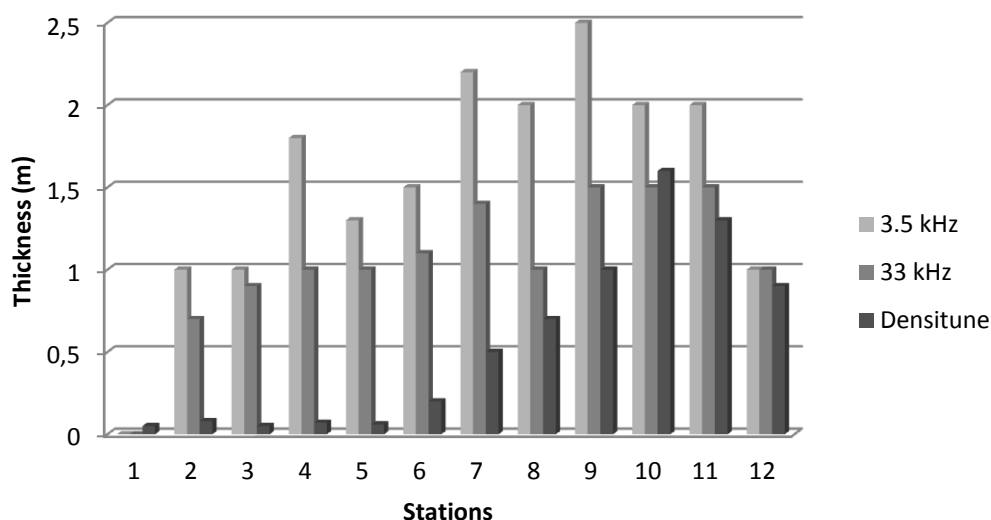


Figura 6: Gráfico apresentando as penetrações dos pulsos de 3.5 kHz, 33 kHz (considerando o fundo como sendo o detectado pela frequência de 210 kHz) e a espessura da camada de lama fluida aferida pelo densímetro.

Macedo et al (2009) encontraram, em uma série de análises de diferentes tipos granulométricos de sedimento, valores baixos de atenuação na lama fluida quando comparados com outros tipos. As maiores penetrações encontradas nas estações onde há lama fluida no conjunto de dados aqui analisados estão de acordo com resultados de outros trabalhos (Kim et al, 2004; Macedo et al, 2009), bem como a teoria de Biot-Stoll, descrita em Stoll (1980) e revisada em Akal (2001): a alta concentração de água nos sedimentos proporciona um movimento quase em fase caso ocorra uma estimulação por onda, quase não existindo dissipação viscosa da velocidade, proporcionando baixa atenuação

Os registros acústicos convencionais para investigação do fundo geralmente não conseguem detectar variações muito pequenas, a menos que passem por uma série de processamentos. A comparação entre os resultados apresentados no gráfico da figura 6 com o gráfico seguinte da figura 7 permite observar que o limite superior da lutoclina não é detectado por nenhuma das frequências dos métodos acústicos utilizados e nem pelo densímetro.

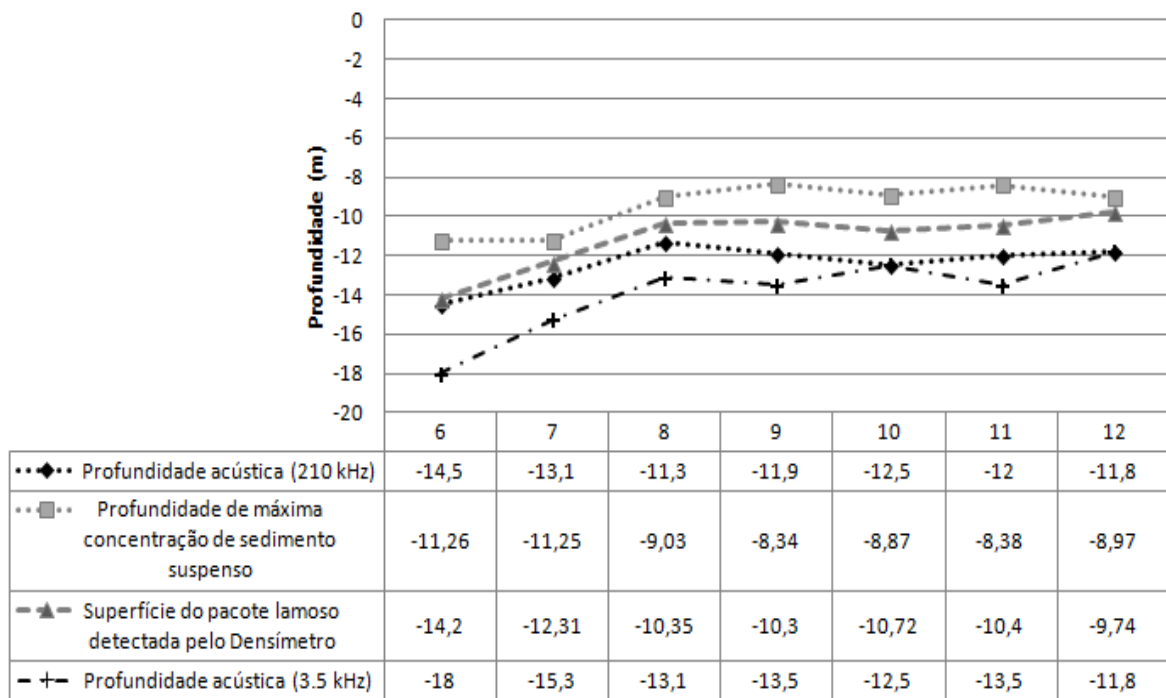


Figura 7: Diferentes profundidades medidas por diferentes métodos nas estações onde foi identificada a presença de lama fluida: profundidades acústicas (3.5 kHz e 210 kHz), profundidade do topo da camada de lama fluida que o densímetro identificou, e profundidade na qual a concentração máxima de material em suspensão foi detectada (sendo 6,5 g/L o limite máximo do equipamento utilizado)

Esses resultados mostram que a detecção do início da lutoclina ocorreu somente utilizando a metodologia óptica (dados provenientes do OBS-3A), e sugere que a detecção do fundo pelos métodos acústicos aqui utilizados eventualmente representa a camada de lama fluida móvel ou, dependendo da frequência utilizada, já estaria aferindo o topo da lama fluida estacionária, ou até mesmo fundo coesivo, cuja consolidação é maior conforme termos utilizados por Ross e Metha (1989).

Lambert et al (2002) estudaram a variação na resposta acústica de sinais de 30 e 50 kHz, e observaram que a frequência mais alta varia mais, isto é, o menor comprimento de onda detecta menores variações no depósito sedimentar. Uma situação que ilustrou bem essa questão foi a identificação da haloclina pela frequência de 210 kHz nos registros da ecobatimetria (Figura 8) das quatro últimas estações do transecto. Embora a lutoclina não tenha sido detectada, essa detecção da haloclina apareceu na forma de um ruído registrado na coluna d'água (entre 2 e 3 metros) e parece ser resultado da alteração da salinidade na coluna d'água, o que sugere uma influência maior dessa propriedade sobre a impedância acústica do que do sedimento em suspensão. Esse tipo de resultado já vem sendo estudado, e atualmente existe um campo de pesquisa chamado "oceanografia

sísmica” que estuda estruturas termohalinas na coluna d’água através de processamento de dados sísmicos, como mostra o trabalho pioneiro nessa área de Holbrook et al (2003). Ruddick et al (2009) também utilizaram dados sísmicos para identificar características da água e até mesmo processos oceânicos e sugerem que futuramente seja possível a inversão das amplitudes de sinal sísmico de modo a estimar a temperatura do oceano.

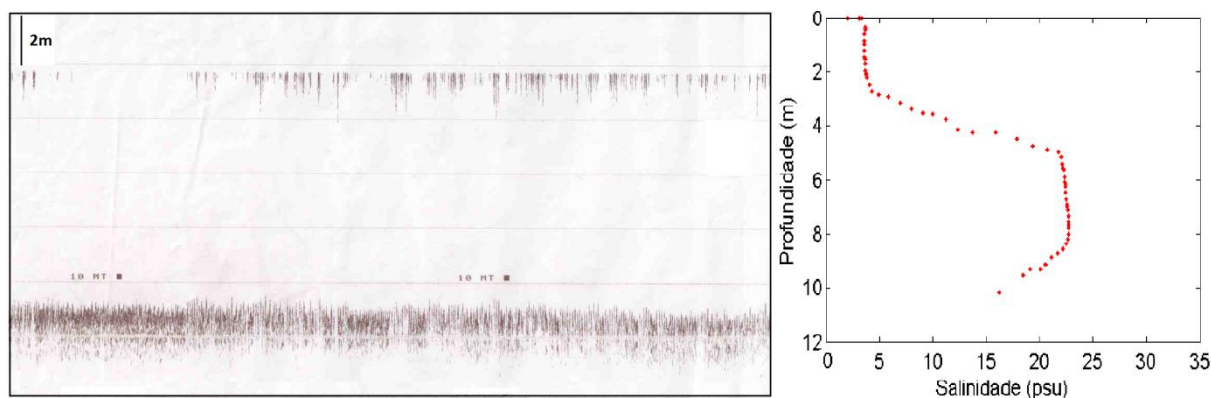


Figura 8: Registro do ecobatímetro que indicou a presença de haloclina na coluna d’água acompanhado com o perfil de salinidade.

Outra observação que deve ser destacada é que o descolamento do eco entre as frequências de 210 kHz e 33 kHz nem sempre representa presença de lama fluida. A interpretação do descolamento das frequências representar lama fluida pode gerar erros associados à navegação, como a definição de profundidade náutica, e a projetos de engenharia costeira, como por exemplo, a aferição de volumes para projetos de dragagens utilizando somente o ecobatímetro, uma vez que não há necessidade de dragagem da lama fluida, pois não oferece riscos à navegação. Fontein & Byrd (2007) discutem a questão da manutenção de portos e destaca que parâmetros reológicos devem ser considerados para delimitação da profundidade náutica, visto que materiais de mesma densidade provenientes de diferentes locais apresentam resistências ao cisalhamento distintas.

No ponto 8, exemplificando a situação acima mencionada, houve uma penetração do sinal de 33 kHz de cerca de um metro, enquanto a camada de lama fluida registrada pela medição de densidade in situ não passou de 70 cm. A figura 9 mostra em detalhe essa diferença entre o descolamento no registro do ecobatímetro e dados do Densitune.

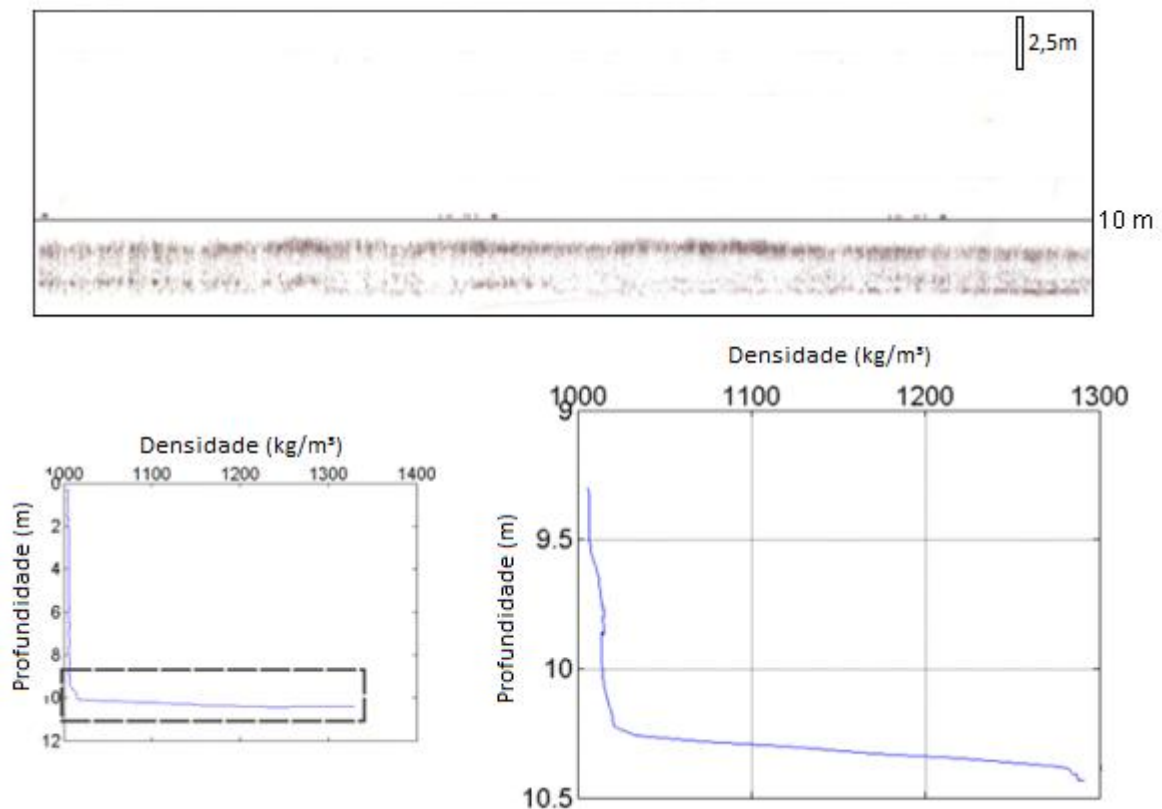


Figura 9: Na parte superior, o registro do ecobatímetro exemplificando nitidamente o descolamento do eco. Na parte inferior esquerda o registro do Densitune; à direita, em destaque as variações de densidade já no sedimento, indicando a presença de lama fluida.

Nessa situação exposta pelos dados, o volume do pacote lamoso apontado pela ecobatimetria de dupla frequência é aproximadamente 128% maior do que o pacote de lama fluida identificado pelo densitune. Schettini et al (2010) também encontraram diferenças na espessura de pacotes lamosos investigada por esses métodos (ecobatimetria e densimetria), salientando que as espessuras de lama mapeadas pelo ecobatímetro foram mais significativas. Quaresma et al (2011) também conseguiram mapear espessuras de pacotes lamosos em uma área portuária através de metodologias indiretas e diretas. Os autores também conseguiram visualizar diferença entre as densidades medidas e os resultados fornecidos pelo método acústico.

2.5 CONCLUSÃO

Foi possível observar que metodologias distintas sondando a mesma área podem fornecer resultados completamente diferentes. Nas análises feitas, a frequência e

algumas propriedades físicas foram importantes para entender as relações entre sedimento superficial e atributos acústicos, como reflexão e penetração do sinal.

Nas estações onde foi encontrada lama fluida (menores densidades superficiais) as reflexões foram mais fracas em função do menor contraste de impedância acústica, e as penetrações foram maiores, possibilitadas, em parte, pela menor atenuação o sinal. Fica evidente também que para uma melhor compreensão da relação entre essas propriedades (penetração x densidade) seria necessário um estudo estratigráfico mais detalhado da seção sondada.

A densidade foi determinante na análise de agrupamentos, bem como apareceu, nas interpretações e na análise de componentes principais, como a variável mais importante na análise de reflexão superficial e penetração do que outras variáveis como a granulometria, indicando a eficácia do mapeamento de densidade junto com levantamentos geofísicos para fins de navegabilidade.

O reconhecimento do limite superior da camada de lama fluida só foi possível utilizando metodologia ótica, indicando que os métodos acústicos utilizados não possuem resolução para esse tipo de objetivo. Em contrapartida, é importante destacar a observação do registro da haloclina nos dados de ecobatimetria, uma vez que a diferença de impedância acústica criada entre as diferentes salinidades é bem pequena.

Estudos mais detalhados envolvendo outras propriedades reológicas dentro da coluna estratigráfica, como por exemplo, limites de plasticidade, podem ser interessantes para aprimorar a compreensão do comportamento do sinal acústico.

2.6 REFERÊNCIAS

AKAL, T. 1970. **The relationship between those physical properties of underwater sediments that affect bottom reflection**. Saclant Asw Research Centre. Technical Report N. 177.

Akal, T. 2001. Acoustics in marine sediments. **Encyclopedia of Ocean Sciences**. Academic press. p.72-88

Amos, C. L., Sutherland, T. F. 1994. A rapid technique for the dertermination of dry sediment mass from saturated marine sands: **Journal of Sedimentary Research**. 64 [3]: 668-670.

Ayres Neto, A.; Mendes, J.N.T.; Souza, M.G.; Redusino Jr., M.; Pontes, R.L.B. 2013. Geotechnical influence on the acoustic properties of marine sediments of the Santos Basin, Brazil. **Marine Georesources & Geotechnology**. 31:2, 125-136.

Baldwin, K.C. 1985. An analysis of 3.5 kHz acoustic reflections and sediment physical properties. **Ocean Engng.** 12: 6, 475-492.

Blott, S. J.; Pye, K. 2001 GRADISTAT: a grain size distribution and statistic package for the analisys of unconsolidade sediments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 1237-1248.

Davis, A.; Haynes, R.; Bennell, J.; Huws, D. 2002. Surficial seabed sediment properties derived from seismic profiler responses. **Marine Geology** 182, 209-223

Falcão, L.C.; Ayres Neto, A. 2010. Parâmetros físicos de sedimentos marinhos superficiais da região costeira de Caravelas, Sul da Bahia. **Rev. Bras. Geof.** 28 (2):279-289

Fernandes, R.D. 2010. **Formação e evolução dos bancos de areia da foz do rio Amazonas**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Fontein, W.F; Byrd, R.W. 2007. **The nautical depth approach, a review for implementation**. Wodcon XVIII Annual Dredging Seminar.

Godinho E. 2012. **Interpretação do sinal acústico de fundos lamosos em ambientes deposicionais distintos: estuário da baía de Vitória e plataforma interna adjacente a foz do rio Doce**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental. Aracruz.

Hamilton, E.L. 1972. Compressional-wave attenuation in marine sediments. **Geophysics**, v.37, n.4, p.620-646.

Hamilton, E.L.; Bachman, R.T. 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. **J. Acoust. Soc. Am.**, 72(6).

Holbrook, W.S.; Páramo, P.; Pearse, S.; Schmitt, R.W. Thermohaline Fine Structure in an Oceanographic Front from Seismic Reflection Profiling. **Science**. 301: 821-824.

Kim, G.Y.; Richardson, M.D.; Bibee, D.L.; Kim, D.C.; Wilkens, R.H.; Shin, S.R.; Song, S.T. 2004. Sediment types determination using acoustic techniques in the Northeastern Gulf of Mexico. **Geosciences Journal**. Vol.8, n1, p.95-103

Kineke, G.C.; Sternberg, R.W.; Trowbridge, J.H.; Geyer, W.R. 1996. Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf. **Continental Shelf Research**.v.16, n5/6, p.667-696.

Kuehl, S. A., C. A. Nittrouer, M. A. Allison, L. E. C. Faria, D. A. Dukat, J. M. Jaeger, T. D. Pacioni, A. G. Figueiredo, and E. C. Underkoffler (1996), Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic fine-grained coastal environment, Cont. Shelf Res., 16, 787–815.

Lambert, D.N.; Cranford, J.C.; Walter, D.J. 1993. Development of a high resolution acoustic seafloor classification survey system. Proceedings of the Institute of Acoustics. Underwater Acoustics Group Conference, University of Bath.

Lambert, D.N.; Kalcic, M.T.; Faas, R.W. 2002. Variability in the acoustic response of shallow-water marine sediments determined by normal-incident 30-kHz and 50-kHz sound. **Marine Geology**, 182: 179-208.

Macedo, H.C.; Figueiredo Jr., A.G.; Machado, J.C. 2009. Propriedades acústicas (velocidade de propagação e coeficiente de atenuação) de sedimentos marinhos coletados nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**. 27(2):195-204.

McAnally, W.H.; F. ASCE; Friedrichs, C.; Hamilton, D.; Hayter, E.; Shrestha, P.; Rodriguez, H.; Sheremet, A.; Teeter, A. 2007. Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior. **Journal of Hydraulic Engineering**. v.133, n.1

PIANC. 1997. **Approach Channels: A Guide for Design**. Report of Working Group No. 30 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin No. 9. Brussels: General Secretariat of the Permanent International Association of Navigation Congresses.

Quaresma, V.S.; Bastos, A.C.; Loureiro, D.V.; Paixão, S. 2011. Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluida no porto de tubarão, vitória (es-brasil). **Revista Brasileira de Geofísica**. 29(3): 487-496.

Robb, G.B.N.; Best, A.I.; Dix, J.K.; Bull, J.M.; Leighton, T.G.; White, P.R. 2006. The frequency dependence of compressional wave velocity and attenuation coefficient of intertidal marine sediments. **J. Acoust. Soc. Am.** 120:5, 2526–2537.

Ross, M.A.; Metha, A.J. 1989. On the mechanics of lutoclines and fluid mud. **J. Coastal Research**. Spec. Issue, 5: 51-62.

Ruddick, B.; Song, H.; Dong, C.; Pinheiro, L. 2009. Water Column Seismic Images as Maps of Temperature gradient. **Oceanography**. 22:1, 192-205.

Schettini, C.A.F.; Almeida, D.C.; Siegle, E.; Alencar, A.C.B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. **Geo-Mar Lett** 30:47-62.

Souza, L. A. P. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Química e Geológica, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Stevenson, I.R.; McCann, C.; Runciman, P.B. 2002. An attenuation-based sediment classification technique using Chirp sub-bottom profiler data and laboratory acoustic analysis. **Marine Geophysical Researches**. 23: 277-298.

Stoll, R.D. 1980. Theoretical aspects of sound transmission in sediments. **J. Acoust. Soc. Am.** 68(5)

WILKS, D. S.. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**, 2nd Ed. International Geophysics Series, v. 59, Academic Press, 627 p.2006.

Wurpts, R. 2005. 15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters. **Terra et Aqua**. 99: 22-32.

CAPÍTULO 3 - INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA SEDIMENTAR EM FUNDOS LAMOSOS A PARTIR DE FERRAMENTAS ACÚSTICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Na interpretação de registros acústicos normalmente são consideradas a frequência utilizada e as características do depósito sedimentar sondado. Contudo, outras questões podem ser abordadas para aprimorar o processamento e interpretação dos dados acústicos. A hidrodinâmica, por exemplo, pode alterar as características do depósito e da dinâmica de sedimentos, processos de floculação e de transporte de sedimento, bem como as condições físico-químicas da coluna d'água (MPS e salinidade). Todos esses processos podem de alguma forma interferir na resposta e consequentemente nos registros dos levantamentos de campo com métodos acústicos (Wall et al, 2011). Dessa forma, técnicas de mapeamento sedimentar do fundo marinho podem ser aprimoradas (Davis et al, 2002; Kim et al, 2004), com uma classificação das respostas acústicas mais detalhadas.

A lama fluida, classificada por McAnally et al (2007) como uma suspensão aquosa de sedimento fino altamente concentrada com densidade entre 1080 e 1200 kg/m³, oferece grande dificuldade em termos de detecção por métodos acústicos convencionais de alta resolução (Schrottke et al, 2006; Veronez Júnior et al, 2009; Godinho, 2012).

Na Plataforma Interna do Rio Amazonas foram mapeadas grandes áreas que mostraram a presença de lama fluida (Kineke & Sternberg, 1995), sendo a movimentação dessas suspensões também objeto de estudos. Sternberg et al (1996), por exemplo, concluíram que a movimentação da lama fluida na plataforma funcionaria como um mecanismo fonte de sedimentos para regiões do prodelta, contribuindo para o crescimento do delta submarino do Amazonas.

A dinâmica desses pacotes lamosos pode ter desdobramentos em várias esferas, desde engenharia, como a questão de monitoramento de portos, até a biologia, com estudos de impacto na biota bentônica. A partir daí é necessário um desenvolvimento de um método rápido e eficiente para mapeamento desses pacotes e para o conhecimento dos processos envolvidos no transporte, deposição e ressuspensão.

Este capítulo tem por objetivo investigar e associar as variações observadas nos registros acústicos com a mobilidade sedimentar ao longo de um ciclo de maré , em uma

estação fixa na Plataforma próximo a desembocadura do Canal Norte do Rio Amazonas. Esta análise foi feita com base na integração de dados de magnitude de corrente, material particulado em suspensão, densimetria do fundo, perfilagem de subfundo (3.5 kHz) e ecobatimetria de dupla frequência (210 e 33 kHz).

3.2 METODOLOGIA

Os dados foram adquiridos próximo à desembocadura do Canal Norte do Rio Amazonas (Fig 10), no âmbito do projeto “Navigation aids for the North Channel of Amazon Rio: Geo-Acoustic Characterization of the sediment dynamics (CANALNORTE/GEOACUSTICA)”. A coleta durou aproximadamente 12 horas em uma estação fixa a uma profundidade de aproximadamente 11,5 metros, no intuito de observar variações em um ciclo de maré de quadratura. Os dados foram coletados a cada hora concomitantemente, com exceção do ADCP que operou todo o tempo. Os equipamentos geofísicos estavam acoplados ao barco e o OBS, juntamente com o densímetro, perfilaram a coluna d’água.

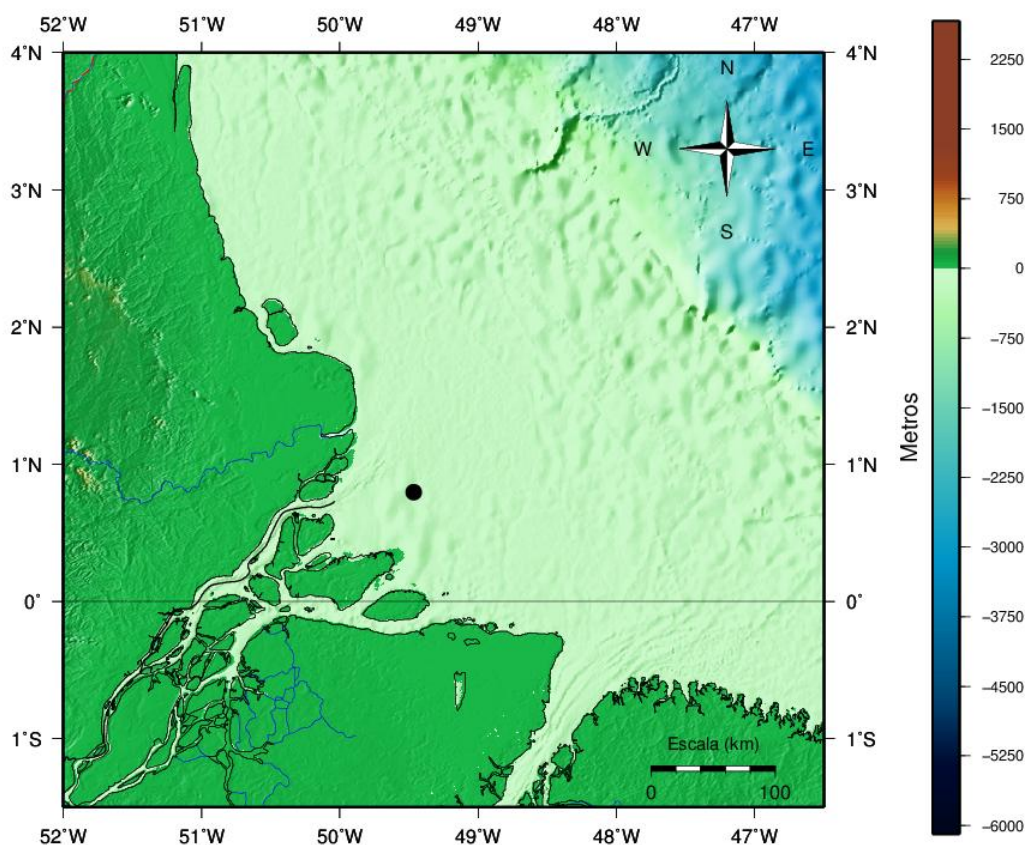


Figura 10: Estação fixa indicada pelo ponto preto na Plataforma Interna do Rio Amazonas.

Levantamento de dados hidrodinâmicos e de material particulado em suspensão

Os dados hidrodinâmicos foram obtidos continuamente com um ADCP (Winriver II 1200 kHz, Teledyne RD Instruments) acoplado ao barco. Além dos resultados de velocidade de corrente, foi possível extrair dos dados o backscatter acústico da coluna d'água com o intuito de observar e avaliar a estabilidade da coluna d'água (Wang, 2010) e as condições de transporte de MPS (Wall et al, 2011).

Já os dados de material particulado em suspensão foram obtidos com o equipamento óptico OBS 3A, da Campbell Scientific. O princípio de medição do equipamento consiste em considerar que o retroespalhamento da luz medido é diretamente proporcional à quantidade e tamanho das partículas em suspensão na amostra; outros fatores além do material particulado em suspensão podem influenciar a medição do sinal de retroespalhamento. O sensor de turbidez do equipamento OBS 3A fornece valores de turbidez na escala NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

Densimetria *in situ*

As medidas de densidade *in situ* foram realizadas utilizando um densímetro (Densitune Silt Density Probe, fabricante Stema Systems), que possui um sensor metálico em diapásão que vibra a uma frequência pré-determinada cuja alteração ocorre de acordo com a densidade do sedimento em que ele é inserido. Os valores de frequência em milivolts são convertidos em g/L.

A calibração dos dados de densimetria foi realizada a partir de amostras de sedimento de fundo coletadas durante a campanha. Para elaboração do arquivo de calibração, as amostras foram homogeneizadas em um recipiente com cerca de 50 L, de forma que o sensor (probe) do densímetro pudesse ser inserido sem contato direto com o recipiente. Depois disso, 2L da amostra foram retirados e pesados, bem como 2L de água em um recipiente similar. Por regra de três foi estabelecida a densidade do sedimento.

$$\text{amostra} = \rho \text{ água} * P(\text{amostra}) / P(\text{água}) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde ρ é a densidade e P é o peso. Foi obtido um grupo de dados acima de 1300 g/L, entre 1300 e 1070 g/L e abaixo de 1070 g/L, com diluição gradativa do sedimento em água doce. A cada etapa de diluição, uma nova amostra de sedimento era retirada e pesada e sua densidade calculada, bem como um novo registro de densidade através do sensor.

Levantamento geofísico de alta resolução

A sondagem geofísica consistiu na perfilagem de subfundo (Stratabox 3.5 kHz) e também utilizou um ecobatímetro operando em dupla frequência (33 e 210 kHz - Syquest modelo Bathy 500DF). A frequência de 3.5 kHz é de uma fonte ressonante e possui o sinal do tipo CW (continuous waveform), bem como o sinal do ecobatímetro utilizado.

Os registros do perfilador de subfundo foram analisados digitalmente no software Kogeo para identificar padrões na assinatura sísmica, enquanto os dados da ecobatimetria de dupla frequência foram interpretados na forma impressa.

Cálculos da tensão cisalhante

A tensão cisalhante foi calculada de acordo com a fórmula descrita por Whitehouse (2000).

$$\tau_0 = \rho * u_*^2 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde ρ é a densidade da água e u_* é a velocidade de fricção, que pode ser obtida usando-se o perfil logarítmico de velocidade:

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo k a constante de Von Karman (0,4) e z_0 corresponde a rugosidade do fundo, aqui considerado como lama (0,2). Os valores de U_z e z utilizados foram os medidos pelo ADCP.

3.3 RESULTADOS

Hidrodinâmica, material particulado em suspensão, tensão de cisalhamento e backscatter

O gráfico da figura 11 apresenta os resultados de velocidade de corrente durante o ciclo de maré. As linhas pontilhadas representam dois momentos distintos de condições hidrodinâmicas que foram tomados como exemplo para comparações posteriores com os registros geofísicos de alta resolução.

As velocidades alcançam 1,3 m/s durante a vazante, enquanto as mais baixas (em torno de 0,05 m/s) ocorrem com um pequeno atraso em relação à estufa de maré.

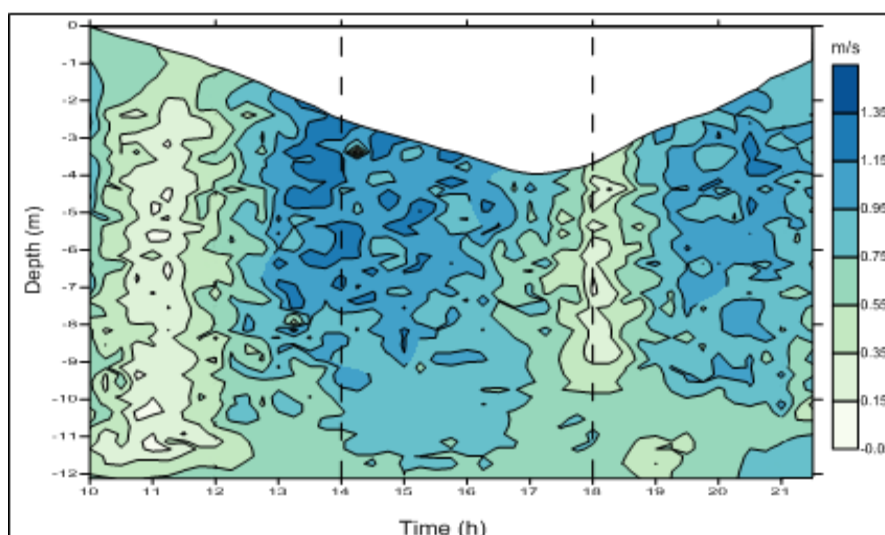


Figura 11: Gráfico mostrando a variação temporal da magnitude das correntes durante o ciclo de maré.

A distribuição de material particulado em suspensão é mostrada no gráfico da figura 12. É possível apontar dois picos de concentração de material em suspensão, próximo às 15 horas e próximo às 20 horas. No entanto, essa distribuição foi feita a partir de uma gridagem (krigagem) e pode distorcer o resultado devido às medições terem sido a cada hora.

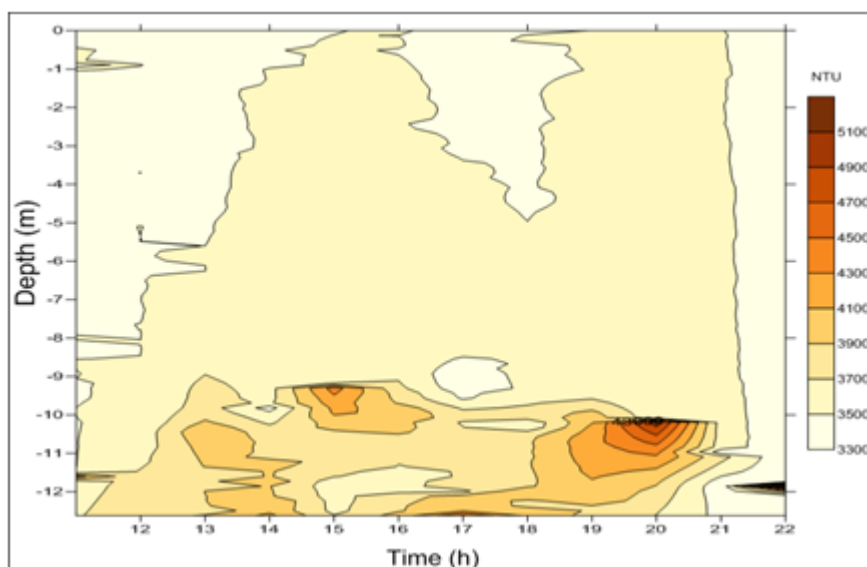


Figura 12: Gráfico da distribuição de material particulado em suspensão na coluna d'água medido através do OBS3A (unidades nefelométricas de turbidez – NTU).

No gráfico da figura 13, foi plotado a concentração do material particulado em suspensão a diferentes profundidades juntamente com a tensão de cisalhamento calculada. Os cálculos de tensão cisalhante foram realizados a fim de corroborar a hipótese de que nos momentos mais energéticos há uma diferenciação da coluna d'água

que é possível ser observada por ferramentas acústicas. Baseando-se na observação desse gráfico, é possível apontar uma tendência da tensão de cisalhamento seguir a curva de maré com um pequeno atraso. Além disso, é importante destacar 3 momentos: a) às 13 horas a vazante começa a acelerar, a tensão de cisalhamento aumenta, a concentração de material particulado em suspensão no fundo diminui, mas a 2 e a 4 metros do fundo ela aumenta; b) às 15 horas a tensão de cisalhamento continua alta, embora a concentração de material particulado em suspensão próximo ao fundo não tenha dado a mesma resposta que às 13 horas; c) entre 17 e 19 horas a tensão de cisalhamento se mantém baixa, o que pode explicar a alta concentração de material particulado em suspensão junto ao fundo. Esses processos serão discutidos adiante na discussão.

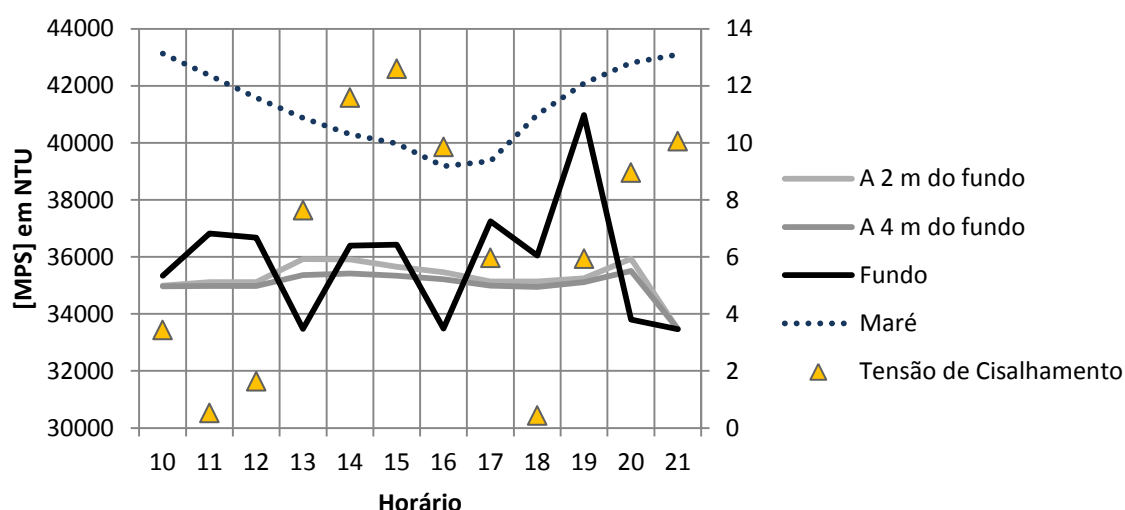


Figura 13: Gráfico com as concentrações de material particulado em suspensão a diferentes profundidades, juntamente com a curva de maré (m) e as tensões de cisalhamento (N/m²).

Os dados de backscatter acústico na coluna d'água foram obtidos a partir dos dados do ADCP, e são apresentados na figura 14. É importante ressaltar que esses dados não foram processados em relação a atenuação, e são apresentados para fins comparativos dos diferentes padrões identificados. Nos momentos de maior energia observa-se uma coluna d'água mais homogênea e misturada, enquanto nos momentos próximos à estufa de maré (18h) aparece um gradiente dessa propriedade.

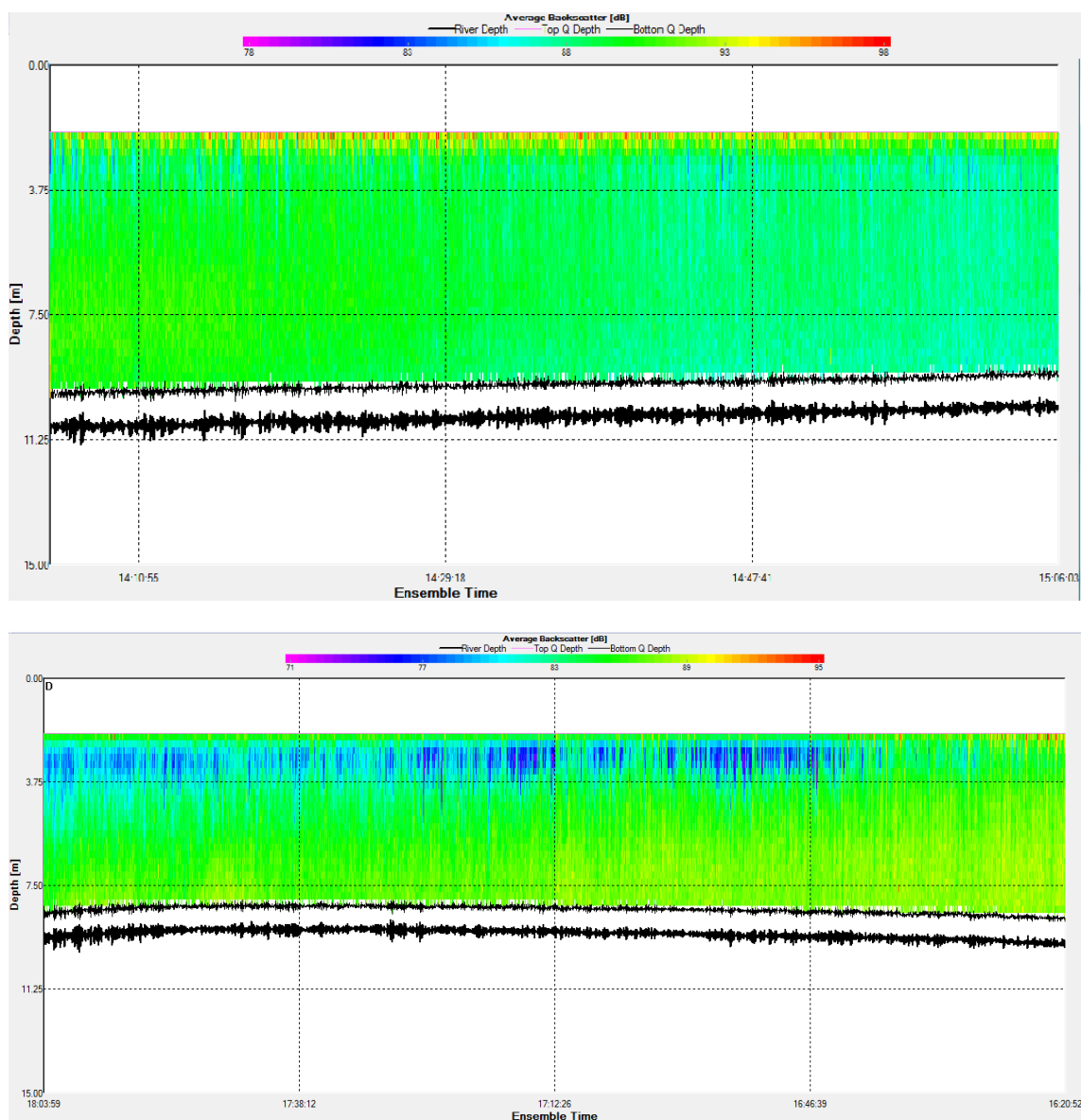


Figura 14: Gráficos de backscatter do ADCP. A imagem superior indica o momento de maior energia, próximo a 14h, enquanto a inferior indica momentos menos energéticos, próximo a 18h (no canto esquerdo).

Densidade *in situ*

As medições do densímetro identificaram a presença de lama fluida, apesar das espessuras serem menores do que 10 cm (considerando que a lama fluida tenha um limite máximo de densidade equivalente a 1200 kg/m^3), conforme visto na pouca suavidade do limite entre água e sedimento. Não foi detectado variação da espessura da camada de lama fluida ao longo das medições. O gráfico da figura 15 apresenta as medições de densidade ao longo da coluna d'água até o fundo marinho durante as 13 horas de coleta.

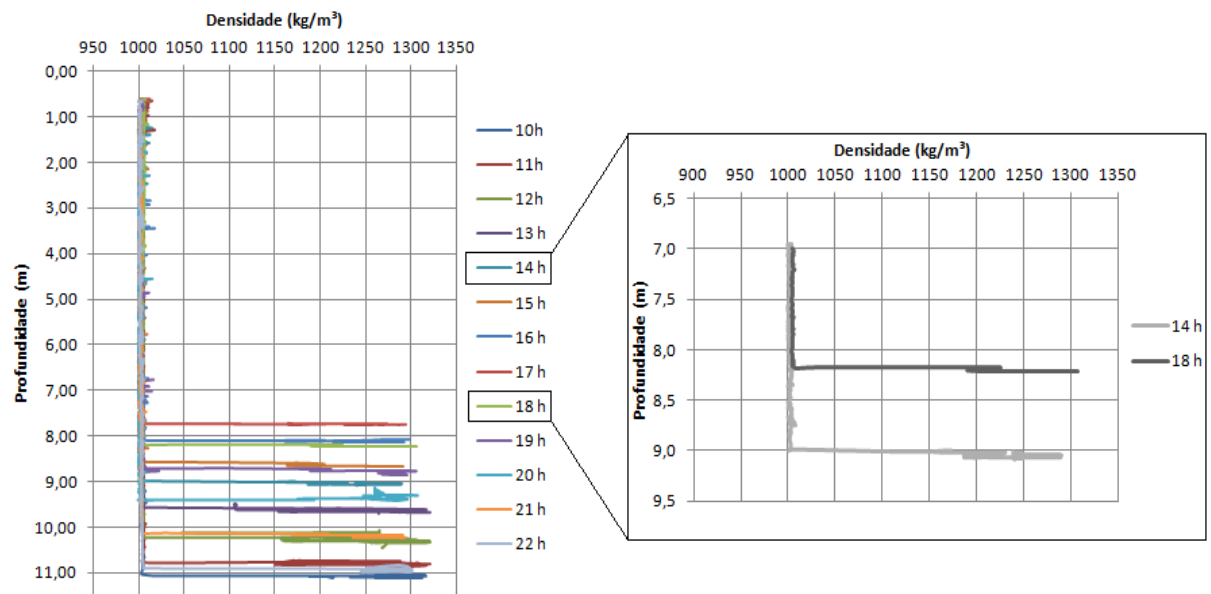
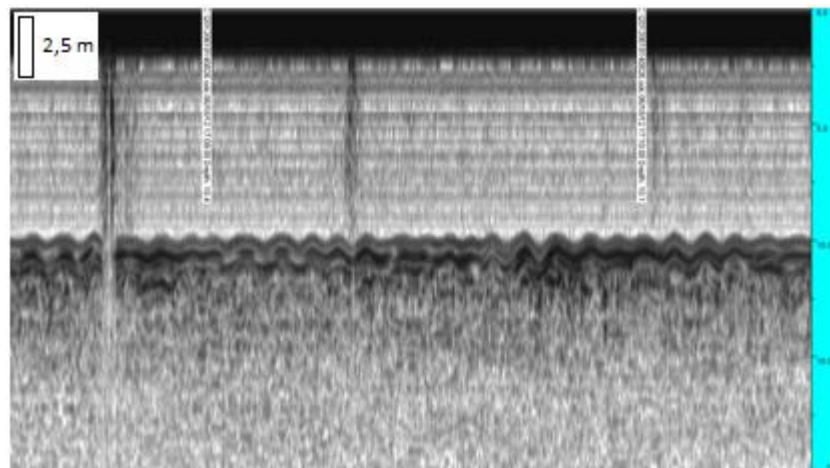


Figura 15: Registros das medições do densímetro a esquerda; a direita registros com destaque para a porção final do perfil em dois momentos (14h e 18h), mostrando a ausência de um pacote espesso de lama fluida.

Registros acústicos

Os registros acústicos de 3.5 kHz mostraram a camada superficial pouco reflexiva e não apresentou mudanças de espessura ao longo do ciclo de maré (Fig. 16).



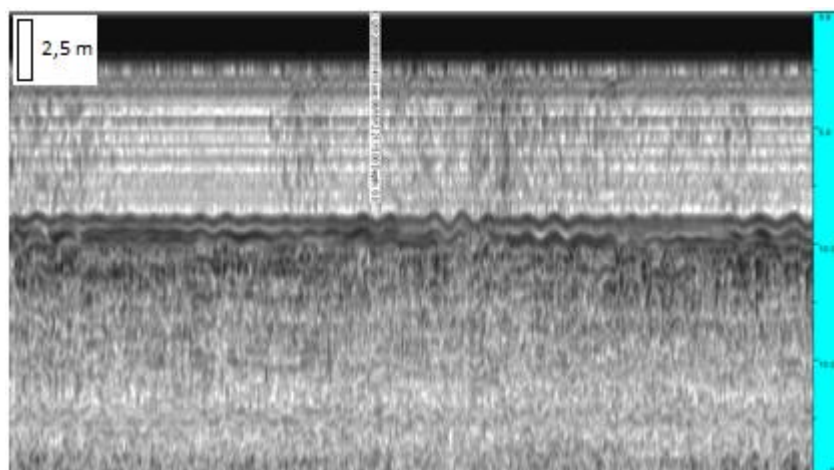


Figura 16: Registros do perfilador de subfundo. O registro superior foi coletado às 14h, e o inferior às 18h.

Nos registros da ecobatimetria foram reconhecidos fundos diferentes pelas duas frequências – descolamento do eco - sugerindo a presença de uma camada de lama pouco consolidada cuja detecção só foi realizada pela frequência de 210 kHz. Contudo, em alguns momentos (próximos à estufa de maré) o descolamento do eco foi mais nítido, enquanto em outros (altas velocidades de corrente) apareceram ruídos entre as frequências (Figura 17). Dessa forma, como não foi possível identificar o processo de formação de lama fluida (visto que não foram reconhecidas variações de espessura), esses ruídos foram interpretados e associados com o transporte de sedimento lamoso na coluna d'água, podendo ser caracterizada uma camada de lama fluida móvel.

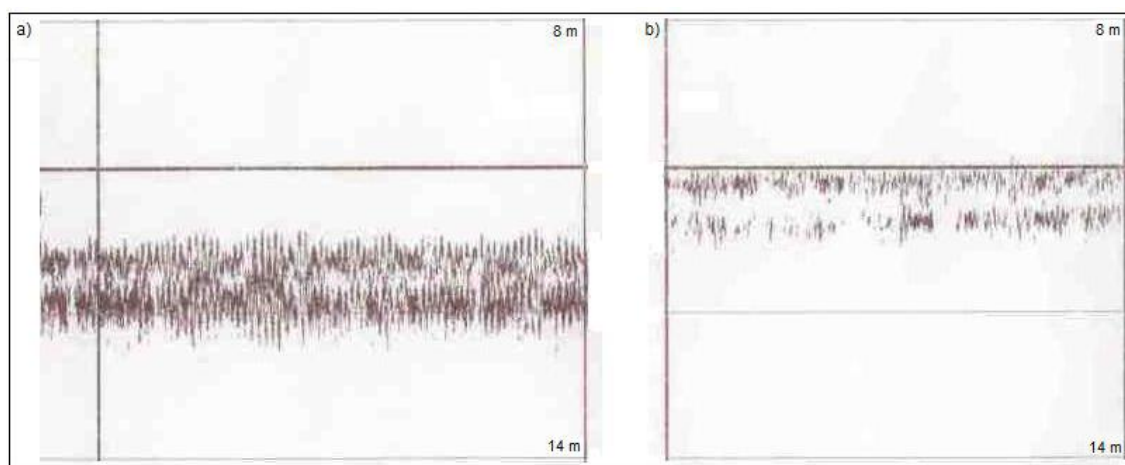


Figura 17: Registros do ecobatímetro para dois momentos: a) às 14 horas, com ruídos entre os horizontes detectados pelas diferentes frequências; b) às 18 horas, com descolamento do eco mais nítido.

3.4 DISCUSSÃO

Além dos resultados terem mostrado que o densímetro não identificou uma camada de lama fluida de mais de 10 cm, o gráfico em destaque da figura 15 (mostrando dois momentos energéticos distintos) indica que a variação de profundidade detectada pelo sensor de pressão do densímetro é a mesma variação da maré entre esses momentos (80 cm), o que sugere que o densímetro não detectou alteração no sedimento do fundo e nem processos de deposição ou de ressuspensão. Já a partir das medições da tensão de cisalhamento observa-se que a magnitude da velocidade de corrente foi quem a controlou, e propiciou alguns processos observados nos dados de material particulado em suspensão. No gráfico da figura 13 foram descritos três momentos: às 13 horas a tensão de cisalhamento está aumentando e a concentração de material particulado em suspensão está diminuindo, sugerindo processo de ressuspensão; observa-se ainda que a curva de medição do OBS-3A aumentou mais a 2 metros do fundo do que a 4 metros do fundo, indicando que o limite da lutoclina nessas condições de maré parece estar mais próximo de 2 metros do fundo. Outro momento apontado nos resultados foi próximo às 15 horas, quando a tensão de cisalhamento é alta mas a curva de concentração de sedimento em suspensão próximo ao fundo não aumenta, o que nos indica que muito sedimento pode ter sido remobilizado e o fundo exposto não consegue ser ressuspenso pela tensão de cisalhamento atuante. Entre às 17 e 19 horas a tensão de cisalhamento se mantém baixa e a concentração de material particulado próximo ao fundo aumenta, indicando um processo de deposição. Os dados de backscatter acústico mostraram maior gradiente nos momentos de menor energia, sugerindo condição favorável para o fortalecimento de estratificação na coluna d'água, enquanto o menor gradiente próximo às 14h sugere um momento de maior energia, maior mistura, e maior capacidade de transporte de sedimento, o que é coerente com o que foi apresentado e interpretado pelos dados de concentração de material particulado em suspensão e da ecobatimetria de dupla frequência. Wang et al (2010) também conseguiram observar a partir do backscatter do ADCP que nos momentos mais próximos a estufa de maré, o gradiente de backscatter era maior do que nos momentos de mais intensa hidrodinâmica.

Os registros da ecobatimetria indicaram uma espessura do descolamento de eco maior do que a espessura de lama fluida medida pelo densímetro. Schettini et al (2010) obtiveram resultados similares ao investigar pacotes lamosos na Baía de Tijuca, identificando espessuras maiores de lama nos registros ecobatimétricos quando comparados aos dados de densimetria *in situ*.

Um dos efeitos que o MPS pode gerar é a reverberação do sinal acústico ainda na coluna d'água, devido às reflexões aleatórias que essas partículas propiciam, o que acaba atenuando uma pequena parte do pulso inicialmente emitido (informação do Manual Syquest). O ruído entre as frequências do ecobatímetro, que foi observado nos momentos de maiores velocidades e maiores tensões de cisalhamento, foi interpretado como indicação de transporte de sedimento. Já o perfilador de subfundo (3.5 kHz) não detectou essa pequena variação pois sua frequência é menor, o que restringe a resolução vertical.

Sottolichio et al (2011) identificaram a partir de medições de concentração de material particulado em suspensão uma variação que tem similaridades com a encontrada nesse trabalho, e propuseram duas hipóteses: i) liquefação do fundo; ii) advecção de lama fluida. As duas hipóteses parecem auxiliar no entendimento desse ruído que apareceu nos registros do ecobatímetro, ou seja, tanto a liquefação do fundo como a advecção da lama fluida podem mudar o padrão de distribuição de material particulado em suspensão e de transporte de sedimento, e isso se refletiu nos registros acústicos. Outro processo que Sottolichio et al apontam (2011) é a destruição da lutoclina pela maré enchente, o que também pode ter ocorrido, pelos dados apresentados, próximo às 21h, quando a tensão de cisalhamento estava grande e a concentração de material particulado em suspensão diminuiu no fundo e a coluna d'água ficou mais misturada.

Em outros estudos, como em Schrottke et al (2006), já foi identificado a formação de lama fluida durante momentos próximos a estufa de maré com métodos acústicos. Contudo, o que parece ocorrer nesse caso é o registro da movimentação de lama fluida, que já foi estudado por Kineke & Sternberg (1995) na Plataforma Amazônica, e corroborou o uso do termo *mobile fluid mud*, cunhado por Ross e Mehta em 1989. Sottolichio et al (2011) destacam que apesar do potencial que métodos acústicos representam para o estudo de dinâmica sedimentar, o aperfeiçoamento desse conhecimento ainda é necessário, principalmente em ambientes com alta concentração de sedimento em suspensão.

A figura 18 tenta sintetizar e relacionar as propriedades e os equipamentos que foram determinantes para interpretação de que o ruído do ecobatímetro é reflexo da dinâmica sedimentar. Assim, o ADCP mediu a hidrodinâmica, que foi quem controlou a tensão de cisalhamento. Isso resultou em variações na distribuição de material particulado em suspensão, que por sua vez era registrado pelo OBS3A e na estratificação do

backscatter do ADCP. Tudo isso faz parte da dinâmica sedimentar local, e a interpretação dos registros do ecobatímetro permitiu visualizar essa dinâmica.

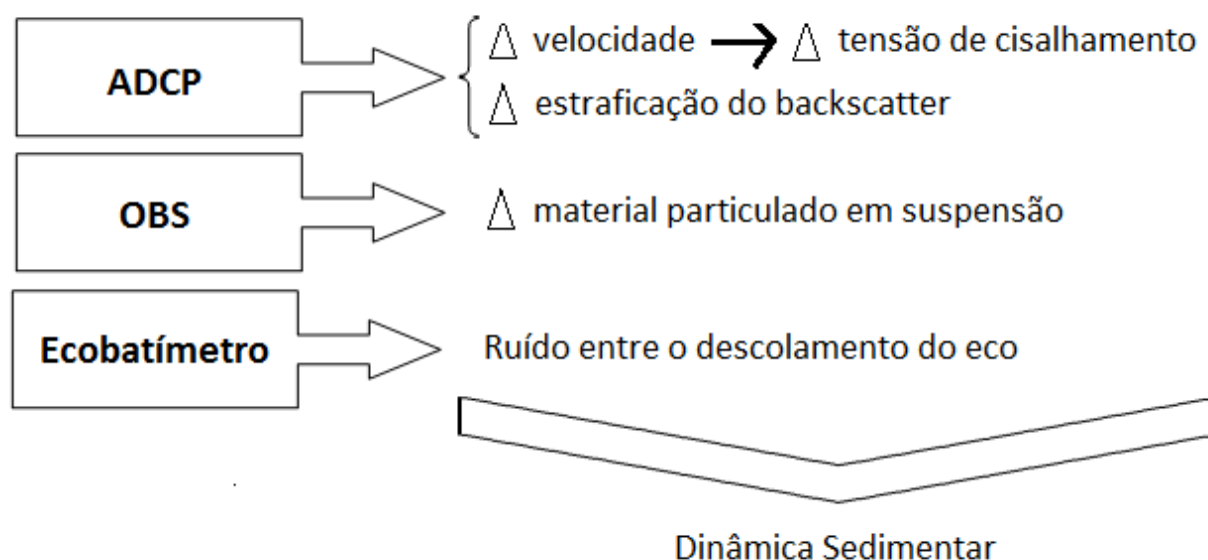


Figura 18: Esquema ilustrativo representando a interpretação da dinâmica sedimentar a partir de ferramentas acústicas e óticas.

3.5 CONCLUSÃO

A hidrodinâmica controlou a tensão de cisalhamento, que por sua vez determinou diferentes concentrações de material particulado em suspensão de acordo com a profundidade. Esses resultados corroboram os padrões vistos nos registros de backscatter do ADCP.

Assim as alterações nos processos de transporte de sedimento reconhecidas pelo ADCP e pelo OBS nessas condições de maré, bem como as condições dos meios de propagação (estrutura vertical do depósito e da água) da onda acústica foram distintas a ponto de os registros acústicos do ecobatímetro identificarem esse processo de dinâmica sedimentar. A frequência acústica do perfilador de subfundo (3.5 kHz) não registrou essas características diferentes do depósito superficial durante o ciclo de maré devido a sua baixa resolução para esse nível de detalhamento, e a densimetria *in situ* também não detectou variações de espessura da camada de lama fluida (considerando-se até 1200 kg/m³). A resposta acústica observada nos registros de ecobatimetria de dupla frequência foi atribuída ao transporte de sedimento durante momentos de alta velocidade de corrente.

3.6 REFERÊNCIAS

Davis, A.; Haynes, R.; Bennell, J.; Huws, D. 2002. Surficial seabed sediment properties derived from seismic profiler responses. **Marine Geology** 182, 209-223

Godinho E. 2012. **Interpretação do sinal acústico de fundos lamosos em ambientes deposicionais distintos: estuário da baía de Vitória e plataforma interna adjacente a foz do rio Doce**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental. Aracruz.

Kim, G.Y.; Richardson, M.D.; Bibee, D.L.; Kim, D.C.; Wilkens, R.H.; Shin, S.R.; Song, S.T. 2004. Sediment types determination using acoustic techniques in the Northeastern Gulf of Mexico. **Geosciences Journal**. Vol.8, n1, p.95-103

Kineke, G.C.; Sternberg, R.W. 1995. Distribution of fluid muds on the Amazon continental shelf. **Marine Geology** 125, 192-233

McAnally, W.H.; F. ASCE; Friedrichs, C.; Hamilton, D.; Hayter, E.; Shrestha, P.; Rodriguez, H.; Sheremet, A.; Teeter, A. 2007. Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior. **Journal of Hydraulic Engineering**. v.133, n.1

Ross, M.A.; Metha, A.J. 1989. On the mechanics of lutoclines and fluid mud. **J. Coastal Research**. Spec. Issue, 5: 51-62

Schettini, C.A.F.; Almeida, D.C.; Siegle, E.; Alencar, A.C.B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. **Geo-Mar Lett** 30:47-62

Schrottke K, Becker M, Bartholomä A, Flemming BW, Hebbeln H. 2006. Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric subbottom profiler. **Geo-Mar Lett** 26(3):185–198

Sternberg, R.W.; Cacchione, D.A.; Paulson, B.; Kineke, G.C.; Drake, D.E. 1996. Observations of sediment transport on the Amazon subaqueous delta. **Continental Shelf Research**, v.16, p.697-715

Veronez Júnior, P.; Bastos, A.C.; Pizzin, B.F., Gava, R.D., Quaresma, V.S.; Silva, C.G. 2009. Sonar de varredura lateral e sísmica de alta resolução aplicados no estudo de ecofácies na baía de Vitória - ES. **Revista Brasileira de Geofísica**, 27(3), 411-425

Wall, G.R.; Nystrom, E.A.; Litten, S. 2006. **Use of ADCP to compute suspended sediment discharge in the tidal Hudson River, NY.** Department of Environmental Conservation, Geological Survey (U.S.)

Wang, L. 2010. **Tide driven dynamics of subaqueous fluid mud layers in turbidity maximum zones of german estuaries.** Phd Dissertation, University of Bremen

Whitehouse, R.; Solsby, R.; Roberts, W.; Mitchener, H. 2000. **Dynamics of estuarine muds.** 1 ed. Londres: Thomas Telford Publishing. 210 p.

CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas neste trabalho envolveram estudo geofísico de interpretação e estudo geoacústico do comportamento do sinal, além de ter abordado no último capítulo questões mais ligadas a dinâmica sedimentar. Com os métodos geofísicos utilizados em conjunto com medições de material particulado em suspensão e de densidade *in situ* foi possível identificar que a camada de lama fluida não é totalmente reconhecida pelas frequências acústicas.

Outras constatações que devem ser apontadas envolvem os resultados estatísticos que mostraram que a densidade é a propriedade do sedimento que melhor respondeu para explicar a reflexão e a penetração do sinal acústico. O padrão observado foi que, conforme menor a frequência e a densidade, maior é capacidade de penetração no depósito, já que densidades baixas refletem menos energia e atenuam menos a onda sonora, e frequências baixas também atenuam menos.

O capítulo dois mostrou um resultado que deve ser destacado e posteriormente mais trabalhado em outros estudos geoacústicos, pois embora as frequências acústicas não tenham identificado o topo da lutoclina, a haloclina foi reconhecida pela frequência de 210 kHz, apesar da diferença de impedância acústica ser bem pequena em relação a um refletor entre duas camadas de sedimentos distintos.

Já o capítulo três tentou combinar duas áreas que geralmente não estão associadas na mesma análise: transporte sedimentar e geofísica. Assim, a partir de um ruído observado nos registros de ecobatimetria de dupla frequência, uma série de análises com base em resultados hidrodinâmicos e de material particulado em suspensão foi realizada para corroborar a interpretação de que o ruído registrado representou transporte de sedimento. Então, essa parte do trabalho mostrou que sistemas acústicos podem auxiliar no entendimento da dinâmica sedimentar dependendo da frequência utilizada, pois a frequência do perfilador de subfundo (3.5 kHz) não conseguiu identificar nada que remetesse a dinâmica sedimentar.

Sendo assim, o trabalho conseguiu consolidar que a densidade é uma variável mais importante do que a granulometria para interpretação de registros acústicos, e que a partir do desenvolvimento de ferramentas geoacústicas bem como o processamento de dados geofísicos, será possível estudar com essas ferramentas características que

exigem alta resolução, as quais convencionalmente não lidam com questões como dinâmica sedimentar e estrutura da coluna d'água.